www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 30, 1969, no. 8/9/10

Tot de groep laboratoria die bijdragen tot de research-inspanning van het Philipsconcern behoren ook de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, die in de nabijheid van Parijs zijn gehuisvest. De organisatorische opzet hiervan verschilt enigszins van die van de andere samenwerkende laboratoria, het onderzoekprogramma vertoont markante individuele trekken, en ook architectonisch heeft dit laboratorium een geheel eigen gezicht.

Het thans voor U liggende nummer van ons tijdschrift is geheel aan het werk van dit Franse laboratorium gewijd. Zoals in vroeger gepubliceerde analoge nummers, die aan de laboratoria in Duitsland en Engeland gewijd waren, is er een inleidend artikel waarin de directeur van het laboratorium de ontstaansgeschiedenis schetst en een globaal overzicht van het verrichte en onder handen zijnde werk geeft. Daarna volgen een reeks artikelen over actuele speciale onderwerpen van de medewerkers van het laboratorium. De redactionele verzorging van de artikelen heeft in hoofdzaak in handen gelegen van een aan het laboratorium zelf verbonden groep medewerkers.

De Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée te Limeil-Brévannes bij Parijs

Historie — Functie — Werkgebieden

C. Ducot

De oprichting

In 1948/49 werden onder leiding van prof. G.-A. Boutry in een gebouw te Parijs, rue du Retrait 23, een aantal laboratoria onder één dak gebracht die zich met geavanceerde technieken op het gebied van de elektronica en de toegepaste fysica bezighielden.

Deze eerste kern van wat later tot de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée zou uitgroeien omvatte een afdeling Elektronenbuizen en vacuümtechniek, een afdeling Speciale schakelingen, die zich vooral bezighield met onderzoekingen over televisie, een afdeling Optica, en een kleine werkplaats, terwijl hier spoedig aan toegevoegd werden een afdeling Schakelingen voor ultrakorte golven en een groep theoretici. Het werk van dit bescheiden geheel werd gefinancierd door een groep Franse ondernemingen van het Philipsconcern, die tevens voor een groot deel in de algemene diensten voorzagen.

Reeds in 1950 werd het wenselijk geacht deze laboratoria organisch tot een enkele onderneming samen te voegen en ze te voorzien van een eigen staf voor de algemene diensten (administratie, bevoorrading, constructiebureau, mechanische werkplaats enz.). Door deze reorganisatie werd tevens een bundeling van de onderzoekgebieden mogelijk en een efficiënte coördinatie van de hulpdiensten voor de afzonderlijke laboratoria.

Zo werd op 4 september 1950 de naamloze vennootschap „Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée" opgericht, in de wandeling aangeduid als het L.E.P. De aandeelhouders van deze vennootschap zijn de Société La Radiotechnique, de Société Télécommunications Radioélectriques et Téléphoniques (T.R.T.), en de Compagnie Française Philips met de hiermee verbonden ondernemingen Hyperélec, Philips Industrie en Philips Matériel Electronique Professionnel.

De opzet van het L.E.P. is van meet af aan enigszins anders geweest dan bij analoge researchorganisaties. Deze worden immers in het algemeen uitsluitend beheerd door vertegenwoordigers van de deelhebbende industriële ondernemingen; in de raad van beheer van het L.E.P. echter waren reeds bij de oprichting de universitaire kringen sterk vertegenwoordigd, zodat een gemakkelijk contact met de natuurwetenschappen aan de universiteiten verzekerd was en tevens een duidelijke oriëntatie op de fundamentele problemen van de fysica.

C. Ducot, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, directeur van de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De functie van het L.E.P.

Uit deze opzet vloeide vanzelf een bepaalde doelstelling voor het Laboratorium voort; om deze nader te beschrijven, moeten wij ons rekenschap geven van wat research inhoudt.

In het verleden — bedoeld is de tijd vóór de explosieve ontwikkeling van wetenschap en techniek van de laatste decennia — kon men zonder moeite onderscheid maken tussen een zuivere wetenschap, gericht op verrijking van onze kennis en in hoofdzaak beoefend aan de universiteit, en een toegepaste wetenschap, gericht op het verkrijgen van nieuwe technische resultaten en in hoofdzaak beoefend in de industrie.

Heden ten dage is de situatie veranderd: enerzijds vraagt de verdieping van onze kennis zo kostbare hulpmiddelen dat men deze alleen kan verkrijgen door aan het economische belang van de industrie of aan het politieke belang van het nationale prestige te appelleren; anderzijds vereist de technische vooruitgang een zo omvattende kennis dat een onderzoek dat zich los weet te maken van enig praktisch doel vaak de beste strategie vormt voor het ontsluiten van de hulpbronnen van de natuur.

Zo wordt het langzamerhand ondoenlijk een scheidslijn tussen zuivere en toegepaste wetenschap te trekken, en men kan de functie van een organisatie voor industriële research zoals het L.E.P. niet meer kenmerken door deze ergens op het traject tussen theoretische zuiverheid en praktische dienstbaarheid te lokaliseren, doch men moet haar beschrijven in termen van de stadia in de ontwikkelingsgang vanaf de initiële research tot de uiteindelijke industriële produktie. Deze stadia zijn:

a) De *„fundamentele" research*, die, hoewel zijn directe doel de uitbreiding van de kennis op een zeker gebied is, toch reeds door een zekere voorstelling van toekomstige toepassingen wordt gericht. Dit stadium eindigt wanneer aangetoond is dat een bepaald verschijnsel geschikt is voor het verkrijgen van een bepaald resultaat.

b) De *gerichte research*, waarbij het gaat om de realisatie van een onderdeel, een opstelling of een apparatuur die zekere voorgeschreven functies vervullen. Dit stadium wordt normaal gesproken afgesloten met een proefontwerp, waarbij nog niet met alle omgevingscondities, betrouwbaarheidseisen enz. rekening is gehouden.

c) De *„ontwikkeling"*, die er op gericht is een onderdeel of een apparaat te realiseren dat de bedoelde functies in een bepaalde omgeving vervult en waarvan men de werking garanderen kan. De afsluiting van dit stadium is het prototype.

d) De uitwerking van *produktiemethodes*, die het mogelijk maken een produkt dat gelijkwaardig is met het prototype zo economisch mogelijk te fabriceren.

Natuurlijk zijn deze stadia niet altijd zo duidelijk te onderscheiden als in deze opsomming. Er zij echter op gewezen dat in geen van deze stadia de research „zuiver" is, d.w.z. geheel vrij van utilitaire oogmerken; alleen domineren in het eerste stadium de theoretische vakken, om in de volgende stadia hoe langer hoe meer het veld te ruimen voor meer technisch of technologisch werk.

Uitzonderingen daargelaten, zal men de doelstelling van een laboratorium voor industriële research in het tweede van deze vier stadia moeten plaatsen, met dien verstande dat het uitwerken van een nieuw produkt dat steunt op een bepaalde in de industrie reeds gangbare techniek natuurlijk in de ontwikkelingsafdeling zal plaatsvinden die tot de desbetreffende fabriek zelf behoort, terwijl bij geheel nieuwe technieken, waarvoor in de hierin geïnteresseerde fabriek zowel de apparatuur als de bekwaamheid nog ontbreken, het researchlaboratorium vaak tot aan de realisatie van kleine series van een bruikbare uitvoering van het produkt zal moeten doorgaan. Anderzijds kunnen de technische eisen, gesteld door een massaproduktie, hun invloed reeds geheel aan het begin van de beschreven reeks, bij de doelstelling van de fundamentele research, doen gevoelen.

Naar de instanties die de middelen fourneren, kunnen nu de werkzaamheden van het L.E.P. in drie grote groepen worden verdeeld:

a) Fundamenteel werk op lang zicht (van de orde van minstens 5 jaar), dat niet noodzakelijk gericht is op een reeds vast omschreven toepassing en waarvan de kosten voor rekening kunnen zijn van grote bevriende ondernemingen of van een der Hoofdindustriegroepen.

b) Onderzoekingen die tot het algemene programma van het Laboratorium behoren, maar die een bepaald doel hebben waardoor zij reeds meer direct tot de belangensfeer behoren van een van de genoemde ondernemingen, zodat zij natuurlijk ook door deze worden gefinancierd. Zulke projecten hebben een kortere looptijd (1 tot 3 jaar). Bij dergelijk werk is La Radiotechnique (R.T.C.) speciaal geïnteresseerd voor zover het onderdelen betreft, en de overige deelhebbende ondernemingen voor zover het installaties en systemen betreft. Verder gebeurt dergelijk werk voor een afdeling van de Société d'Etudes et de Réalisations Nucléaires (SODERN), die zich bezighoudt met bepaalde technieken, b.v. op het gebied van kerntechniek of ruimteonderzoek, waarbij geen massaproduktie te pas komt.

c) Geavanceerde onderzoekingen die tot de competentie van het Laboratorium behoren en die voor een nauwkeurig omschreven toepassing in opdracht gegeven en gefinancierd worden door bepaalde voor technische projecten verantwoordelijke regeringsor-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ganen, zoals het C.E.A. (Commissariat à l'Energie Atomique), de S.E.F.T. (Section d'Etudes et Fabrications des Télécommunications), het C.N.E.S. (Centre National d'Etudes Spatiales), het L.R.B.A. (Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques), het O.R.T.F. (Office de Radiodiffusion-Télévision Française). Het programma voor een dergelijk onderzoek wordt contractueel vastgesteld, de looptijd is meestal 1 of 2 jaar, maar vaak worden vervolgopdrachten gegeven als de eerste resultaten dit rechtvaardigen. In dit verband moeten we ook nog noemen de gedeeltelijke financiering door bepaalde hulporganisaties voor de research, zoals de D.G.R.S.T. (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique), de D.R.M.E. (Direction des Recherches et Moyens d'Essais) en de Délégation à l'Informatique.

De wetenschappelijke en technische specialisatie van het Laboratorium in de begintijd werd enerzijds bepaald door de interessesferen van de medewerkers van het eerste uur, en anderzijds door de grote technische lijnen die zich voor de industrieën op het gebied van elektronica en toegepaste fysica aftekenden. Hierdoor kwam het arbeidsterrein vanzelf te liggen in het raakvlak van optica en elektronica, en als eerste grote onderwerpen bleken voor het L.E.P. aangewezen de foto-elektriciteit, de televisie, de ultrakortegolf-radioverbindingen en het infrarood.

Deze taak in het grensgebied tussen optica en elektronica is het Laboratorium trouw gebleven, mits men die omschrijving ruim opvat en rekening houdt met de wijzigingen die op de beide gebieden zelf in de loop der laatste twee decennia zijn opgetreden, zoals het verschijnen van de halfgeleiders, de microminiaturisatie en de geïntegreerde schakelingen, de steeds uitgebreidere toepassing van de computer, de quantumelektronica, de niet-lineaire optica, het ruimteonderzoek enz.

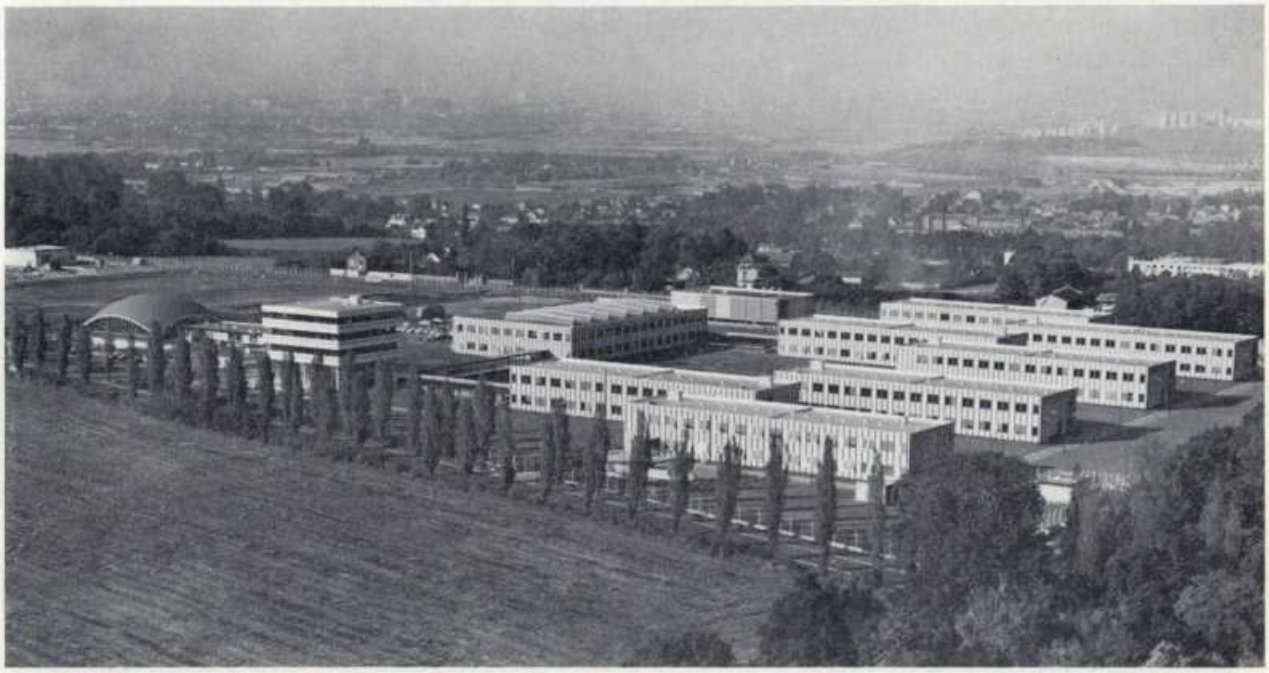


Foto F. Dengremont

Fig. 1. De gebouwen van de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée te Limeil-Brévannes.

De huidige situatie van het Laboratorium

In het Laboratorium werken thans ongeveer 300 personen. Een kwart hiervan zijn afgestudeerden van universiteiten en hogescholen, de helft zijn technici, en het resterende kwart is werkzaam in de dienstverlenende sectoren.

Het wetenschappelijke en technische personeel is tegenwoordig verdeeld over vijf afdelingen: Elektronenbuizen en Vacuümtechniek, Chemie, Halfgeleiders en Optica, Algemene Elektronica, en ten slotte Theoretische Fysica en Toegepaste Wiskunde.

De sterke groei van het personeel maakte een verhuizing van het Laboratorium van de rue du Retrait naar ruimere en betere gebouwen nodig. Een nieuwe behuizing werd in de jaren 1962 tot 1965 op een terrein van 11 ha te Limeil-Brévannes, even ten zuiden van Parijs, gebouwd. Sinds april 1965 is hier het gehele Laboratorium ondergebracht. Het in gebruik zijnde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vloeroppervlak bedraagt 15000 m², waarvan ongeveer de helft voor algemene doeleinden, verbindingsgangen, collegezaal, ontvangst- en conferentiekamers enz., en de andere helft voor het eigenlijke researchwerk, studeerkamers, enz. De foto *fig. 1* geeft een overzicht van het gehele complex, *fig. 2* een plattegrond. Een nadere beschrijving is elders gegeven [1] [*].

In fig. 1 en 2 ziet men dat het werk van het Laboratorium zich afspeelt in een hele reeks met elkaar samenhangende gebouwen. Bij de aanleg is naar een sterke normalisatie van afmetingen gestreefd, zowel bij de gebouwen zelf als bij scheidingswanden en installaties (distributieleidingen voor gassen enz.); zo is een grote flexibiliteit bereikt voor de in de toekomst zeker te verwachten wijzigingen in de onderbrenging van de groepen en hun apparatuur. Anderzijds is er ook een zekere verscheidenheid, b.v. in de vloerbedekking en in de luchtverversingssystemen, naar gelang van het soort onderzoekingen dat in de verschillende gebouwen wordt gedaan.

De algemene doelstelling van het Laboratorium is sinds de oprichting nooit essentieel gewijzigd; toch worden de paden waarop het huidige onderzoek zich beweegt, vergeleken bij het begin, door twee tendenties gekenmerkt die typisch zijn voor de huidige elektronica en toegepaste fysica:

a) Op gebieden waar vroeger de vacuümelektronica heer en meester was, komt thans een toenemende betekenis toe aan verschijnselen en schakelingselementen gebaseerd op de vaste stof.

b) Onderwerpen die zich eerst onafhankelijk hebben ontwikkeld bevruchten elkaar wederkerig en leiden tot projecten waartoe twee of meer technologieën moeten bijdragen.

Hieruit moet men niet afleiden dat de vacuümelektronica aan het aftakelen is: hoewel deze geleidelijk stukken van haar traditionele terrein moest prijsgeven aan de halfgeleiders, krijgt zij toch telkens ook gelegenheid voor nieuwe ontwikkelingen, b.v. in neutronenbuizen voor industriële toepassing, in buizen voor het opnemen, omzetten of versterken van beelden, in buizen die als sluiters voor zeer snelle fotografie werken, en in oscilloscoopbuizen voor uiterst snel verlopende verschijnselen.

Wat betreft de contacten met andere organisaties, kan men zeggen dat de betrekkingen met de reeds genoemde grote Overheidsorganen nog intensiever en veelzijdiger geworden zijn. Zoals te begrijpen is, gaat het bij deze nauwere betrekkingen speciaal om bepaalde activiteiten die thans in het brandpunt van de belangstelling staan, zoals het ruimteonderzoek. Op dit gebied zijn ook betrekkingen aangeknoopt met sommige Europese organisaties, zoals E.L.D.O. (European Space Vehicle Launcher Development Organization) en E.S.R.O. (European Space Research Organization). Deze contacten met de grote organisaties worden in het algemeen hetzij door het L.E.P. zelf onderhouden, hetzij in samenwerking met de bevriende industriële ondernemingen, naar gelang het opgedragen werk voor een groter of kleiner deel tot de eigenlijke research hoort.

Anderzijds verschaffen uitstekende betrekkingen met het researchlaboratorium van Philips te Eindhoven en met andere, hiermee verbonden, laboratoria in verschillende Europese landen aan het L.E.P. de toegang tot talrijke technologieën waarvan de ontwikkeling niet rechtstreeks tot de eigen researchactiviteit van het L.E.P. behoort. Een bijzonder belangrijk facet in deze betrekkingen is de geregelde uitwisseling van wetenschappelijke medewerkers tussen deze laboratoria. Er zijn natuurlijk gevallen waarbij een open uitwisseling van informatie niet is toegestaan, omdat de betrokken werkzaamheden om de een of andere reden aan geheimhouding onderworpen zijn, maar bij die contacten waarbij het om de opsporing of interpretatie van fundamentele fysische verschijnselen gaat — en daarbij zijn de contacten juist het vruchtbaarst — bestaat de genoemde belemmering slechts zelden.

Ten slotte zij vermeld dat dit Laboratorium, dat sinds zijn oprichting en uit hoofde van zijn opzet altijd vele betrekkingen met de natuurwetenschappelijke faculteiten van de Universiteiten heeft onderhouden, in de laatste jaren dergelijke betrekkingen met nieuwe organen heeft aangeknoopt. Er bestond reeds lang een samenwerking met het C.N.A.M. (Conservatoire National des Arts et Métiers) en met verscheidene technische onderwijsinstituten; er heeft zich nu ook een samenwerking ontwikkeld met de Faculteit der Natuurwetenschappen te Lille, het Nationaal Pedagogisch Instituut, de Medische Faculteit te Straatsburg enz.

Enige resultaten die op de verschillende werkgebieden zijn bereikt

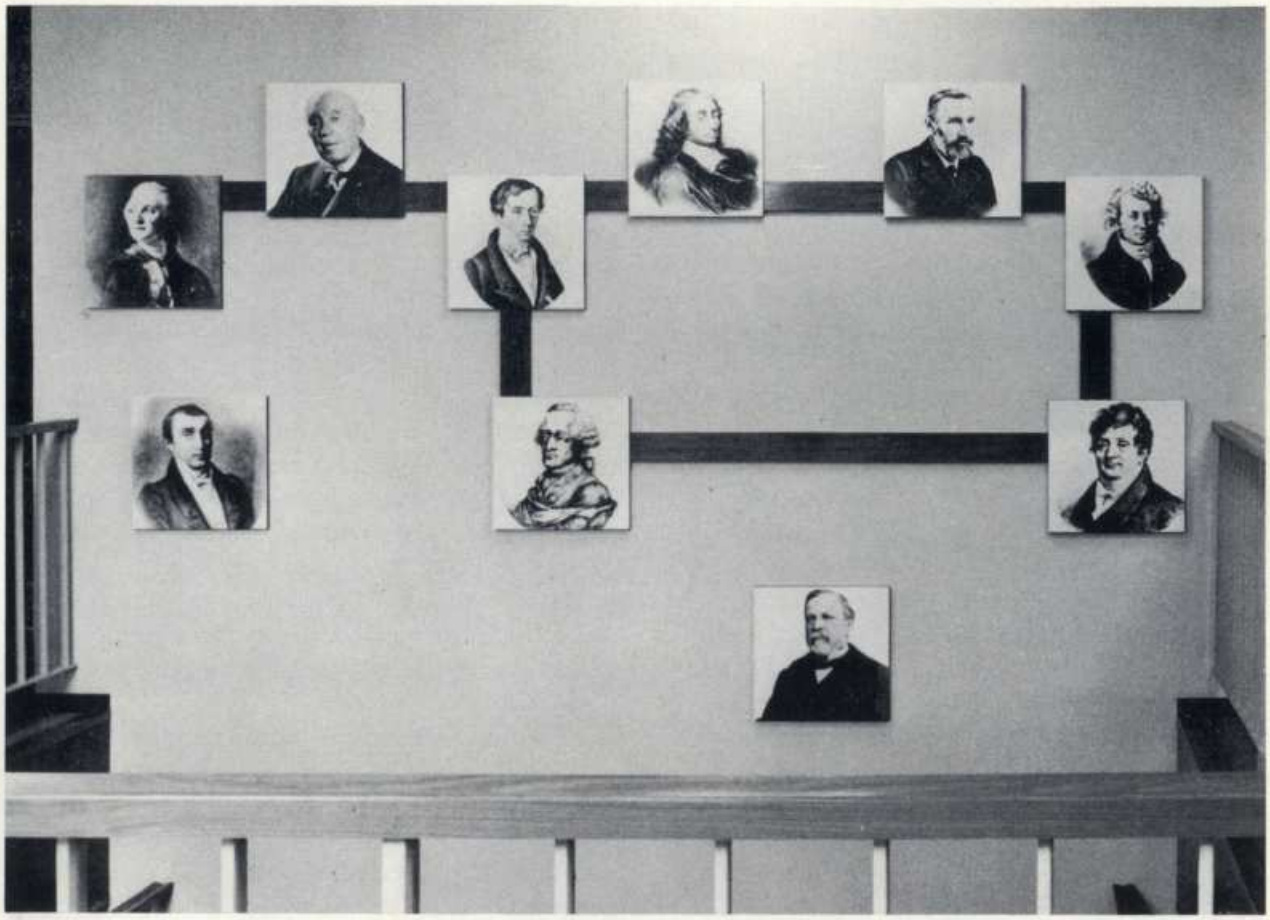
Het geheel van onderwerpen waarop de activiteit van het L.E.P. gericht is geweest of zich thans richt, kan niet gemakkelijk in een logische volgorde worden gepresenteerd, ten gevolge van de vele overlappingen, die vaak tot een — opzettelijke en zeer wenselijke — samenvloeiing of bundeling van onderwerpen aanleiding geven. Zo heeft het verband van de onderwerpen meer weg van de structuur van een weefsel dan van die van een keten.

De volgorde waarin we nu enkele opmerkingen willen maken over bepaalde uitgevoerde onderzoekingen of verkregen resultaten is dan ook min of meer willekeurig. Vanzelfsprekend kan men hier geen volledige of ook maar summiere bespreking van al het door het

[*] *De literatuuropgaven vindt men aan het eind van het artikel.*

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



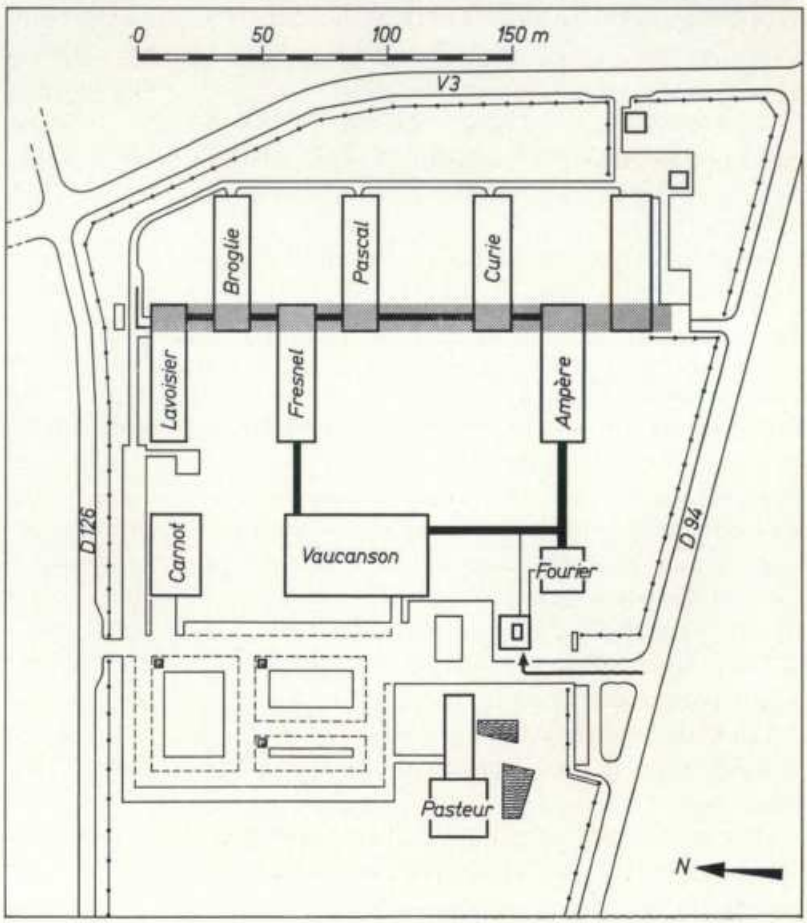


Fig. 2. *Rechts:* Plattegrond van de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée te Limeil-Brévannes. De gebouwen waarin de verschillende afdelingen van het Laboratorium zijn gehuisvest dragen elk de naam van een beroemd Frans geleerde waardoor min of meer de aard van het in dat gebouw verrichte werk tot uitdrukking wordt gebracht (Lavoisier symboliseert uiteraard de chemische afdeling, Vaucanson het constructiebureau en de werkplaatsen, enz., terwijl de namen van Carnot en Pasteur heel toepasselijk leken voor het ketelhuis en voor het gebouw waarin de medische en sociale voorzieningen alsmede de kantine zijn ondergebracht). De meeste gebouwen zijn onderling verbonden door een overdekte gang. Beneden de verbinding tussen Lavoisier en Ampère bevindt zich een onderaardse ruimte (in de figuur grijs aangegeven), die gelegenheid voor optische experimenten met een onbelemmerde stralengang van bijna 200 meter lengte biedt.
Boven: Het trappenhuis van het gebouw Fourier (waarin directie, administratie, bibliotheek en collegezaal zijn ondergebracht) bevat als wandversiering een schematische plattegrond van het gehele gebouwencomplex, waarbij elk gebouw niet is aangeduid door de naam van de desbetreffende geleerde doch door diens portret.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Laboratorium verrichte werk verwachten; we zullen hieruit slechts enkele grepen doen, in de hoop dat de lezer hierdoor een beter idee zal krijgen van het verband tussen de verschillende onderzoekingen die door een aantal auteurs in dit nummer worden behandeld.

1) Het *foto-elektrische effect in vacuümbuizen*, met name de *fotomultiplicators*. Dit onderwerp is sinds de oprichting van het Laboratorium voortdurend en steeds intensiever bewerkt. Aanvankelijk was het onderzoek gericht op het leren kennen en het uitwerken van de technologie, en tevens op de fysische grondslagen en de werking van deze buizen. Thans zijn de belangrijkste doelstellingen enerzijds het tot het uiterste opvoeren van de eigenschappen van gevoeligheid, versterking, responsiesnelheid en het beperken van de geometrische afmetingen van de klassieke buizen, anderzijds het maken van buizen van geheel ander type.

Als uitvloeisel van deze onderzoekactiviteit vindt in de verbonden fabrieken (R.T.C.-Hyperélec) ontwikkelingswerk plaats dat tot de fabricage van talrijke soorten buizen geleid heeft, die voor de experimentele fysica en vooral voor de kernfysica van belang zijn. Door deze produkten nemen het L.E.P. en de verbonden fabrieken op het gebied van de fotomultiplicators zowel nationaal als internationaal (in Europa en de V.S.) een belangrijke plaats in. In de bibliografie aan het einde van dit artikel zijn een aantal publikaties vermeld die een voorstelling van het verrichte werk geven; deze publikaties betreffen de fotomultiplicators van de eerste generatie[2], de tegenwoordige fotomultiplicators[3], de fotomultiplicators met snelle responsie, die bestemd zijn voor de experimentele fysica[4], en het onderzoek van de foto-emissie-eigenschappen van laagjes van alkalimetalen[5].

Als meest recente resultaten op dit gebied noemen we de „transfermethode" — een techniek voor het formeren van fotokatodes en het monteren van buizen in vacuüm — en de koppeling van twee nieuwe soorten elektronenmultiplicators aan het foto-elektrische gedeelte van de buis, nl. 1) een secundaire-emissie-multiplicator, bestaande uit een bundel zeer nauwe pijpjes waardoor als het ware puntsgewijze een elektronenvermenigvuldiging verkregen wordt; en 2) een halfgeleidermultiplicator, die in feite niets anders is dan een detector voor beta-straling, d.w.z. voor snelle elektronen, en waarbij de multiplicatie verkregen wordt doordat elk elektron meer ladingdragers vrijmaakt naarmate het zelf met een grotere energie aankomt.

Een korte beschrijving van deze aanwinsten voor de techniek wordt in twee artikelen in dit nummer gegeven[6][7].

Deze recente technische ontwikkelingen kunnen worden gebruikt voor het construeren van een hele reeks nieuwe buizen: beeldomzetters, elektronische sluiters voor ultrasnelle fotografie, beeldversterkers voor het zien bij zeer laag helderheidsniveau of voor de waarneming van zeer kort durende verschijnselen, fototellers waarbij de halfgeleidermultiplicator wordt gebruikt om impulsen naar het aantal primaire elektronen te onderscheiden, hetgeen met de klassieke secundaire-emissievermenigvuldiger niet goed mogelijk was, enz.

2) Het werk aan *buizen voor ultrakorte golven* is in het L.E.P. achtereenvolgens op twee geheel verschillende categorieën gericht geweest: inhaalbuizen (klystrons) van groot vermogen en lopendegolf-oscilloscoopbuizen.

In de jaren 1957-1962 hebben wij klystrons met drie of vier trilholten gemaakt die voor groot vermogen en grote bandbreedte geschikt waren. Het nieuwe bij deze buizen was vooral dat de diameter van de elektronenbundel aanzienlijk kleiner gekozen was dan de diameter van de loopbuizen, waardoor de kans op stroomverlies aan elektrodehouders en op het „multipactor"-effect beperkt werd. Voor de constructie van buizen met vermogens tot 2 kW is gewerkt met glas-metaalaansmeltingen, voor nog grotere vermogens met aansmeltingen van metaal aan keramiek[8].

Na 1962 is het onderzoek en de vervaardiging van oscilloscoopbuizen voor zeer grote bandbreedte (van frequentie nul tot enige GHz) ter hand genomen. Het betreft hier buizen waarbij het signaal als in een lopendegolfbuis door een vertragingslijn met de elektronenbundel wordt gekoppeld. Het doel van deze buizen is de rechtstreekse oscilloscopie (in „real time") van zeer kort durende eenmalige signalen, zoals men die vooral in de fysica van de elementaire deeltjes tegenkomt. Immers, een stroboscopische waarneming is bij deze toepassingen vaak niet mogelijk, aangezien daarvoor een regelmatige herhaling van de signalen nodig is. In een artikel in dit nummer[9] wordt de tegenwoordige stand van zaken beschreven; de buizen worden gefabriceerd door R.T.C.-Hyperélec.

3) De *televisie* is sinds de oprichting van het Laboratorium vrijwel onafgebroken, hoewel onder zeer verschillende aspecten, onderwerp van onderzoek geweest.

In de eerste plaats ging het hierbij om de kleurentelevisie; op dit gebied zijn niet alleen onderzoekingen gedaan over de mogelijke systemen, maar ook over de fysische en fysiologische grondslagen. Het hoogtepunt van deze activiteit werd bereikt in 1957, met een aantal bijdragen tot het internationale colloquium „Problèmes Physiques de la Télévision en Couleurs", gepubliceerd in Acta Electronica[10]; het reeds voordien ontwikkelde systeem „Double message" werd elders beschreven[11].

Daarna zijn andere problemen op televisiegebied aangepakt, met name wat betreft de overbrenging en de opname, o.a. voor reportages. We noemen enkele resultaten op dit gebied:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

a) Een twee-normen-camera (1960), waarmee precies dezelfde scène gelijktijdig met 819 en met 625 lijnen kan worden opgenomen[12][13].

b) Verschillende camera's voor buitenreportages, voorzien van steeds geraffineerder schakelingen om de hanteerbaarheid, de onafhankelijkheid, de flexibiliteit en de coördinatiemogelijkheden van zulke reportages te verzekeren[14]. Enkele hiertoe gebruikte middelen zijn:

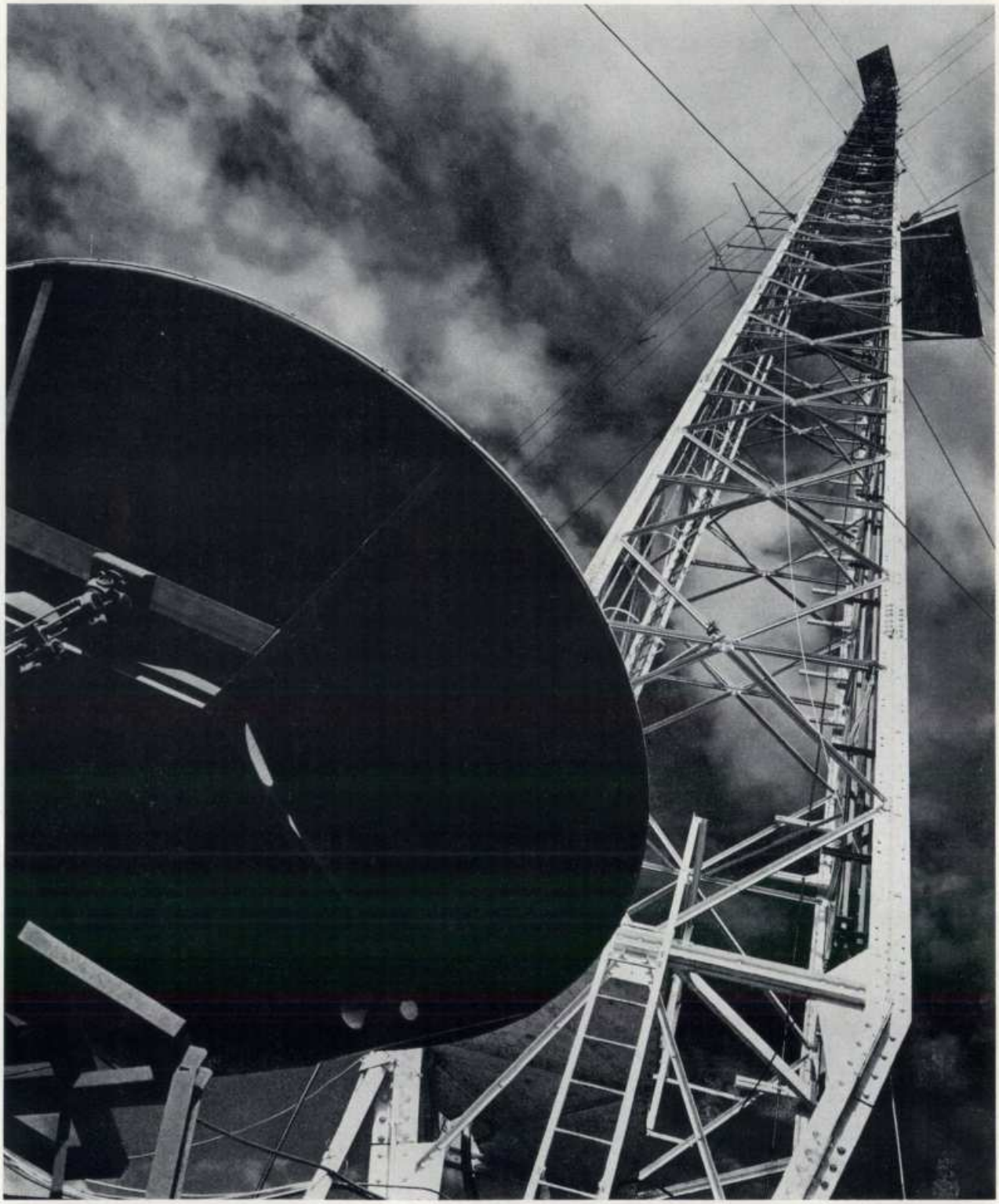


Fig. 3. Tussen 1950 en 1957 is door het LEP in samenwerking met T.R.T. veel werk gedaan aan ultrakortegolf-straalzenders voor verbindingen met „direct zicht". De in 1957 geïnstalleerde verbinding tussen Bordeaux en de Pic du Midi (in de Pyreneeën, waarbij een multireflexklystron werd gebruikt, betekende in die dagen een wereldrecord: er werd een televisie-uitzending met groot lijnental rechtstreeks over een afstand van 213 km overgebracht. Op de foto ziet men het antennesysteem van de zender te Bordeaux, met een parabolische antenne op de begane grond en een rechthoekige passieve reflector bovenop de mast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een op decimetergolven werkende straalzenderverbinding tussen cameraman en reportagewagen, waardoor de verbindingskabel onnodig wordt.

Een automatisch intersynchronisatiesysteem van de camera's die vanuit een zelfde reportagewagen worden gedirigeerd.

Een automatische instelinrichting voor richtantennes, ter vermijding van echo's en interferenties door ontvangst langs verschillende wegen.

Al deze schakelingen werden vervolgens getransistoriseerd en daarna geminiaturiseerd, om gelijke tred te houden met de ontwikkeling van de techniek.

De opeenvolgende uitvoeringsvormen van deze apparaturen, ontwikkeld in samenwerking met het O.R.T.F. en vervaardigd door T.R.T., zijn gebruikt bij gebeurtenissen die als mijlpalen in de ontwikkeling van de televisiereportage te boek staan, te beginnen met de eerste afvaart van de oceaanstomer „France" in februari 1962, tot de 24-uur-autoraces te Le Mans in september 1968.

4) Ook aan het onderwerp van de *telecommunicatie* met straalzenders zijn uitgebreide en veelsoortige onderzoekingen van het L.E.P. gewijd. Dit werk werd ondernomen in opdracht van en in samenwerking met T.R.T.

Vanaf 1950 tot 1957 hebben wij ons op dit gebied beziggehouden met straalzenders voor „direct zicht" (d.w.z. waarbij de ontvangantenne zich binnen de horizon van de zendantenne bevindt); zie *fig. 3*. Als basis voor dit werk diende de multireflexiebuis, ontwikkeld door F. Coeterier in het Philipslaboratorium te Eindhoven[15]. Dit was in die tijd de enige buis die met een behoorlijk rendement (meer dan 20%) continu een vermogen van 10 of 15 W bij 3400 MHz kon leveren.

Later is het werk voortgezet met schijftriodes voor 4000 MHz, en er zijn belangrijke bijdragen geleverd tot een reeks verschillende televisiestraalzenders, die door T.R.T. zijn ontwikkeld en waarmee thans talrijke verbindingen in Frankrijk en daarbuiten zijn uitgerust[16][17][18].

Inmiddels begon in 1956 het werk aan straalzenders voor zg. troposferische uitbreiding. Tussen 1958 en 1964 zijn hiervoor verscheidene onderzoekingen gedaan en installaties gebouwd[19].

De tegenwoordige onderzoekingen op dit gebied betreffen niet zo zeer het systeemaspect van de straalzenders als wel de invoering van halfgeleideronderdelen, die de vroeger door vacuümbuizen vervulde functies kunnen overnemen.

Op telecommunicatiegebied kunnen verder de onderzoekingen over parametrische versterking worden genoemd (zie het laatste in [19] aangehaalde artikel), o.a. de parametrische versterking met loodrecht magnetisch stuurveld [20].

5) De *omzetting van stralingsenergie in elektrische energie* door halfgeleiders. Op dit gebied zijn aanvankelijk, van 1955 tot 1961, een reeks onderzoekingen gedaan over cellen en batterijen van silicium-fotodiodes voor toepassingen op aarde. Van meet af aan viel voor deze onderzoekingen de keuze op structuren van *N*- op *P*-materiaal, in plaats van de in de begintijd nog algemeen verbreide structuren van *P*- op *N*-materiaal. De produktie werd door R.T.C. ter hand genomen.

Een overzicht van deze onderzoekingen is in Acta Electronica gegeven[21]. Na 1963 is dit werk voortgezet met een speciaal onderzoek over silicium-zonnebatterijen voor ruimtetoepassingen, waarbij uiteraard speciale eisen worden gesteld aan het rendement, het gewicht, het volume en de omgevingscondities waaronder de batterijen werken. Ten dienste van dit ruimteonderzoek zijn eveneens onderzoekingen gewijd aan de cadmiumtelluridecellen, ter ondersteuning van de fabricage hiervan. Dank zij al dit werk beschikt R.T.C. thans over een serie zonnebatterijen die aan verschillende behoeften aangepast zijn, en dit heeft geleid tot de levering van opnemers, horizonaftasters en zonnebatterijen voor verschillende ruimtevoertuigen (de satellieten D1C, D2, TD, ESRO II, het project Eole enz.). Rekening houdende met verliezen door de omhulling enz. zijn met de siliciumbatterijen netto-rendementen tussen 10 en 11% bereikt.

6) De onderzoekingen van het L.E.P. over de *stralingsdetectie met halfgeleiders* zijn vooral gericht geweest op het fotospanningseffect in *P-N*-overgangen, d.i. dus in principe hetzelfde verschijnsel waarvan bij de energieomzetting gebruik wordt gemaakt. Het zal echter duidelijk zijn dat de detectie van zwakke signalen, waarbij het gaat om de *informatie* die deze bevatten, ten aanzien van de optimalisatie van de parameters geheel andere problemen stelt dan de energieomzetting.

In het L.E.P. zijn vooral de responsiesnelheid en de infraroodgevoeligheid van de stralingsdetectors aan de orde gesteld. Het probleem van de responsiesnelheid is en wordt bij de silicium- en germanium-fotodiodes onderzocht; de responsietijden, die enkele jaren geleden nog verscheidene nanoseconden bedroegen, zijn thans een orde van grootte kleiner geworden, en tevens wordt ernaar gestreefd de versterkingsfactor van de detector op te voeren door gebruik te maken van het lawine-effect in de halfgeleider.

Wat betreft de infraroodgevoeligheid, interesseren wij ons niet alleen voor het nabije infrarood, waarvoor silicium en germanium gevoelig zijn, maar ook voor langere golven (4 en 10 micron), waarbij men met de eigen thermische straling van lichamen die zich op normale temperatuur bevinden kan werken, en in de laatste tijd zelfs voor golven tot 15 micron, die speciaal geschikt zijn voor het stabiliseren van de stand

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van satellieten met behulp van horizonaftasters. Bij deze zeer lange golven moet men vaak zijn toevlucht nemen tot bolometrische detectors, want de met absorptie van een foton overeenkomende energiesprongen zijn dan zo klein dat de detectors met *P-N*-overgangen alleen nog bij afkoeling tot uiterst lage temperaturen te gebruiken zijn, wat voor de toepassing in een satelliet bezwaarlijk is. Bij golven van 3 of 4 micron daarentegen geven de in dit Laboratorium vervaardigde *P-N*-detectors van indiumantimonide of indiumarsenide reeds bij matige koeling (in vloeibare stikstof) bruikbare resultaten, die voor talrijke aardse toepassingen van belang zijn, in het bijzonder voor het zien in het infrarood[22].

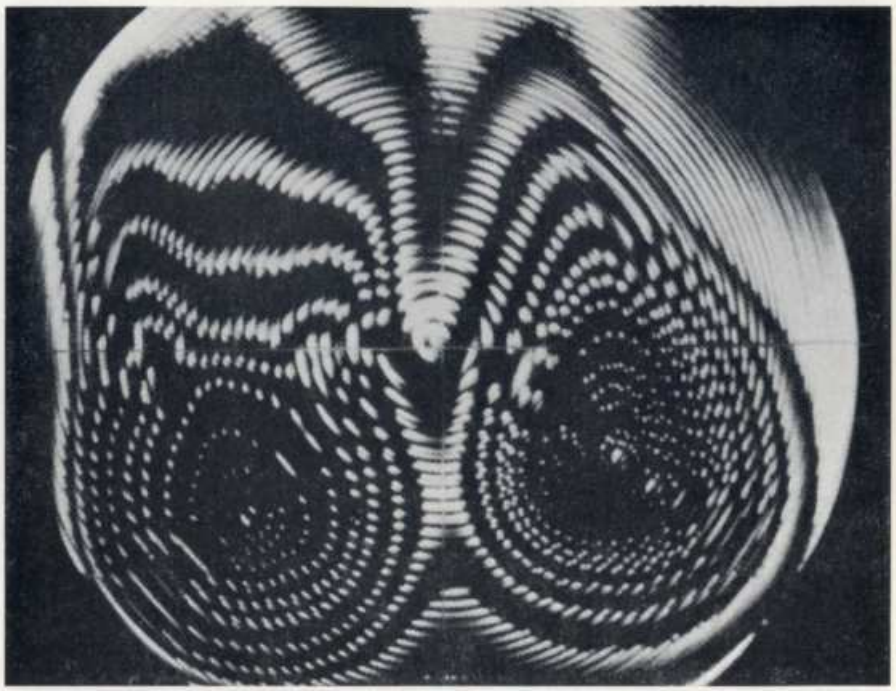


Fig. 4. „Thermische kaart" van een vrouwenborst, opgenomen door passieve waarneming in het infrarood op golflengten in de buurt van 4 μm. De temperatuur in de beide toppen is slechts 2 °C hoger dan in de koudste gedeelten.

Bij deze opname werd een opto-mechanisch systeem met spiraalvormige aftasting gebruikt. In modernere apparaten voor thermografie past men in plaats hiervan een lijnaftastsysteem evenals in de normale televisie toe [24].

7) Het onderwerp van het *zien in het infrarood*, waarbij we aldus beland zijn, sluit op vele punten bij het voorgaande aan en hieraan wordt dan ook reeds lange tijd bij het L.E.P. gewerkt. Het werk richt zich op twee geheel verschillende oplossingen:

a) „Actieve" waarneming, waarbij de scène met infrarode straling wordt verlicht en een beeld ervan wordt ontworpen dat men met methodes ontleend aan de televisie zichtbaar maakt.

b) „Passieve" waarneming, waarbij de eigen thermische straling van de waar te nemen lichamen gebruikt wordt om het zichtbare beeld te verkrijgen.

Voor het eerste geval zijn opneembuizen gemaakt van het vidicontype, uitgerust hetzij met een fotogeleidende trefplaat van loodoxysulfide op een siliciumonderlaag, hetzij met een trefplaat die een mozaïek van *P-N*-overgangen van germanium bevat[23]. In het L.E.P. en later bij T.R.T. zijn camera's met elektronische aftasting voor deze buizen gebouwd. Deze kunnen voor actieve waarneming worden gebruikt; natuurlijk zijn zij echter ook voor de passieve waarneming van voldoend hete objecten te gebruiken (b.v. met temperaturen boven 150 of 180 °C).

Voor de passieve waarneming hebben wij systemen ontwikkeld met puntvormige detectors voor golven van 4 of 10 micron en met een opto-mechanische aftasting, waarmee een „thermisch landschap" van normale temperaturen kan worden waargenomen (*fig. 4*). Deze zg. thermografie vormt een waardevol nieuw onderzoekmiddel op medisch en industrieel gebied. Een apparatuur voor dit doel wordt in dit nummer beschreven[24].

In dit laboratorium is ook een tussenoplossing tussen de tweedimensionale trefplaat en de puntvormige detector voor het zien in het infrarood onderzocht: een reeks puntvormige cellen gerangschikt langs een rechte lijn, waarbij alleen de langzame aftasting (de beeldaftasting) mechanisch moet gebeuren, terwijl de snelle aftasting (lijnaftasting) door een elektronische schakelaar kan worden teweeggebracht.

In verband met bovengenoemde onderzoekingen zijn verschillende typen infrarood-objectieven vervaardigd; deze worden in een artikel in dit nummer[25] en in het laatste van de onder [26] aangehaalde artikelen beschreven.

Over de infrarood-technieken zijn een aantal zeer uitgebreide publikaties verschenen in acht speciale nummers van Acta Electronica[26][27].

8) Het onderwerp van de *informatieverwerking* heeft in het L.E.P. tot de volgende resultaten geleid:

a) Bureaurekenmachines met nieuwe logische schakelingen[28], eerst met optische „display" (1958-1962), daarna met een elektromechanische drukker (1962-1966)[29].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

b) Snelle elektromechanische drukkers, waarmee snelheden van de orde van 3000 regels tekst per minuut worden bereikt[30].

c) Diagramschrijvers volgens hetzelfde principe.

d) Apparaten ten dienste van het onderwijs, met name voor de onmiddellijke statistische analyse en registratie van de antwoorden die door de leerlingen op keuzevragen worden gegeven[31]. Zulke apparaten kunnen de leraar doorlopend op de hoogte houden van de mate waarin zijn gehoor hem volgen kan.

9) Het algemene werk aan *ultrasnelle elektronica* is in het L.E.P. te pas gekomen bij de vervaardiging van buizen (zie hierboven onder (2) op blz. 222) en van schakelingen voor oscilloscopie met grote bandbreedte in „real time"[9], en vervolgens bij de bouw van ultrasnelle fotocamera's[32].

Men kan constateren dat deze snelle elektronica, waarvan het scheidend vermogen nog slechts 3 of 4 jaar geleden in de buurt van 1 nanoseconde lag, ook zelf snel in snelheid vooruitgaat, en dat men nu een scheidend vermogen bereikt van de orde van enkele tientallen picoseconden.

10) Een algemeen onderzoekgebied waartoe men kan rekenen de *quantumelektronica*, de *elektro-optica* en de *niet-lineaire optica* is vertegenwoordigd met een aantal onderzoekingen over de lasers[33] en over de modulatie van licht voor informatie-overbrenging[34].

Het belangrijkste praktische doel bij het onderzoek op dit gebied is de toepassing van elektro-optische methodes van lichtmodulatie voor een optische versterkbuis voor projectiedoeleinden. Een kort verslag hiervan wordt in dit nummer gegeven[35].

11) Vanzelfsprekend zouden al deze onderzoekingen op het gebied van elektronica en fysica niet kunnen worden uitgevoerd als zij niet geschraagd werden door *fysisch-chemisch werk* aan de te gebruiken materialen.

Voor de techniek van de halfgeleiders en van de elektro-optica zijn materialen nodig met een chemische zuiverheid en een kristalzuiverheid, ver uitgaande boven hetgeen bij oudere technieken in het algemeen nodig werd geacht. De chemische afdeling van een laboratorium dat zich op deze nieuwe gebieden beweegt moet derhalve niet alleen de traditionele methodes beheersen, die noodzakelijk blijven om de dienstverlening aan de verschillende afdelingen te verzekeren, maar zij moet ook eigen onderzoekingen doen over de technologie van het zuiveren, het bereiden, het selecteren, het analyseren enz. van de nieuwe materialen. De chemische afdeling van ons Laboratorium (*fig. 5*) heeft daardoor enerzijds een belangrijk aandeel gehad bij de uitwerking (of zelfs bij de opzet) van bepaalde elektronische onderdelen waarbij polykristallijne materialen te pas komen (b.v. voor opneembuizen [23][36]), en anderzijds heeft zij in toenemende mate aandacht besteed aan de techniek van de monokristallen, zowel van halfgeleiders als van optische en elektro-optische materialen. In de bibliografie zijn een aantal oudere onderzoekingen van dit soort vermeld[33][37][38], enkele nieuwe resultaten zijn in dit nummer beschreven[39][40].

12) Eveneens als feitelijke research-onderwerpen moeten hier ten slotte enkele *technologieën* worden vermeld: aansmeltingen van allerlei materialen, uiterst nauwkeurige mechanische bewerking, constructies met materialen van zeer geringe sterkte, de techniek van zeer hoge vacua. Enkele mededelingen in dit nummer betreffen werk op dit gebied[41][42][43].

Conclusie

Hierboven is reeds gezegd dat we slechts enkele losse grepen uit ons werk zouden doen en, zelfs in bondige vorm, geen complete beschrijving hiervan konden geven. Het hoofddoel van dit artikel was, de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée aan de lezer voor te stellen en de verderop in dit nummer beschreven onderzoekingen in het juiste kader te plaatsen.

Daarnaast zal, hopen wij, uit de gegeven fragmentarische aanduidingen duidelijk geworden zijn dat het werk van ons Laboratorium, evenals van ieder ander researchlaboratorium, zich afspeelt op de grenzen van wat men reeds kan en wat men nog niet kan; zo schuilt er in dergelijk werk steeds een element van helderziendheid en een gokelement. Wanneer de techniek zich zo snel ontwikkelt als heden ten dage, vormt deze situatie tegelijkertijd de kracht en de zwakte van de onderzoekers, maar als zij van het goede hout gesneden zijn, zal juist deze situatie hun enthousiasme en hun vasthoudendheid prikkelen.

Literatuur

[1] Acta Electronica **9**, no. 2, 1965: Un ensemble moderne de laboratoires de recherches (conception et réalisation) (blz. 101-199).

[2] G. Piétri, Conception et réalisation de photomultiplicateurs, Acta Electronica **1**, no. 2, 35-46, 1956.

[3] G. Piétri en J. Nussli, Ontwerp en eigenschappen van moderne fotomultiplicatorbuizen, Philips techn. T. **29**, 276-296, 1968 (no. 8/9). (Rectificatie in no. 10, blz. 305).

[4] G. Piétri, Les photomultiplicateurs, instruments de physique expérimentale. Problèmes rencontrés dans leur conception, leur réalisation et leur mise en oeuvre, Acta Electronica **5**, 7-30, 1961.

[5] G.-A. Boutry en H. Dormont, Enkele eigenschappen van het oppervlak van zuivere alkalimetalen, blz. 229 in dit nummer.

[6] R. Legoux, De transfertechniek, een nieuwe methode voor de formering van fotokatodes; J. Nussli, Fotomultiplicators en de transfertechniek, blz. 238 en 241 in dit nummer.

[7] G. Eschard en R. Polaert, Het vervaardigen van elektronenmultiplicatorpijpen en pijpenplaatjes, blz. 257 in dit nummer.

[8] C. Zlotykamin, Réalisations de klystrons de puissance à large bande, Acta Electronica **4**, 47-57, 1960.

[9] G. Andrieux en C. Loty, Directe oscilloscopie van snelle verschijnselen, blz. 261 in dit nummer.

[10] Acta Electronica **2**, no. 1/2, 1957/58, *Coll. int. Problèmes physiques de la télévision en couleurs*: G.-A. Boutry en P.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 5. Een gedeelte van de Chemische Afdeling in het gebouw Lavoisier. Men ziet o.a. installaties voor het kweken van monokristallen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Billard, Visibilité des structures récurrentes dans les systèmes de télévision à analyse entrelacée (blz. 61-70). — P. Billard, Les seuils différentiels de luminance en télévision. Application à la recherche des caractéristiques de luminance optimum d'une chaîne de télévision (blz. 283-292). — J. Périlhou, Recherche de l'économie dans un système de télévision industrielle en couleurs (blz. 363). — R. Genève, Présentation d'images de télévision en couleurs obtenues avec les systèmes N.T.S.C. et „Double message" (blz. 371-377). — G.-A. Boutry, Colour television problems of to-day: an attempted survey (blz. 411-416).

[11] G.-A. Boutry en R. Genève, Etude du système de télévision en couleurs „Double message", Onde électr. **37**, 337-357, 1957.

[12] P. Billard, L. Enselme, J.-M. Fournol, J. Maillard en M. Olifsson, Une caméra de télévision à double standard, Acta Electronica **4**, 289-314, 1960.

[13] R. Genève, Appareillages de prises de vues de télévision, Caméras à images multiples et équipements transistorisés, Acta Electronica **4**, 127-149, 1960.

[14] J. Cayzac, Een installatie voor televisiereportages met draagbare camera's, blz. 309 in dit nummer.

[15] F. Coeterier, De multireflexiebuis, een nieuwe oscillatorbuis voor zeer korte golven, Philips techn. T. **8**, 257-267, 1946. F. Coeterier, De multireflexiebuis als zendbuis in een straalzenderverbinding, Philips techn. T. **17**, 293-298, 1955.

[16] C. Ducot, Straalzenders met dubbele frequentiemodulatie, Philips techn. T. **17**, 281-292, 1955.
Acta Electronica **1**, no. 1, 1956: C. Ducot, Les télécommunications par faisceaux hertziens (blz. 9-15). — G. Andrieux, Réflecteurs passifs pour faisceaux hertziens (blz. 35-46). — J. Cayzac, Procédé de contrôle automatique de fréquence en ondes centimétriques (blz. 47-53).

[17] G. Andrieux, Amplificateurs de puissance à triodes pour 4000 Mc/s, Onde électr. **37**, 777-780, 1957.

[18] Onde électr. **39**, no. 384, 1959 (Communications au Congrès International „Circuits et antennes hyperfréquences", Parijs 1957): R. Havot, Filtres de branchement pour faisceaux hertziens à 4000 MHz (blz. 180-185). — R. Dessert, Eléments de circuits hyperfréquence non réciproques utilisant des ferrites (blz. 215-221).

[19] Acta Electronica **9**, no. 3, 1965, *Systèmes de transmission à grande distance par ondes dirigées*: C. Ducot, Les télécommunications à grande distance par faisceaux dirigés. Quelques aspects de leur évolution (blz. 211-214). — C. Ducot, Problèmes de bruit liés à la transmission de signaux aux radiofréquences très élevées et aux fréquences optiques (blz. 215-226). — C. Ducot, Systèmes de modulation utilisables dans les liaisons hertziennes à grande distance (blz. 227-240). — R. Astor en J. Cayzac, Equipement pour liaison troposphérique utilisant la modulation d'amplitude à porteuse supprimée (blz. 241-254). — Y. Beurel en G. E. Zaaijer, Equipements UHF de réception à faible bruit pour transmissions à grande distance (blz. 255-268). — G. E. Zaaijer, Contribution à la théorie des amplificateurs paramétriques à résistance négative (blz. 269-291).

[20] G. Marie, Amplificateurs paramétriques basses fréquences à commande magnétique orthogonale, I en II, Acta Electronica **8**, 7-81 en 93-151, 1964.

[21] Acta Electronica **5**, no. 3, 1961, *Conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique*: F. Desvignes, La conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Fonctionnement et rendement des cellules solaires photovoltaïques (blz. 275-303). — C. Beauzée, Etude expérimentale des cellules solaires au silicium (blz. 305-329). — F. Desvignes en C. Beauzée, Aspects économiques de la fabrication et de l'utilisation des cellules solaires (blz. 379-391).

[22] F. Desvignes, J. Revuz en R. Zeida, Foto-elektrische vaste-stof-schakelelementen voor beeldwaarneming in het infrarood, blz. 270 in dit nummer.

[23] M. Berth en J.-J. Brissot, Beeldelektrodes voor opneembuizen ten dienste van infrarood-televisie, blz. 277 in dit nummer.

[24] M. Jatteau, Een apparatuur voor infrarood-thermografie voor medische toepassingen, blz. 285 in dit nummer.

[25] C. Hily, Lenzenstelsels voor afbeelding in het infrarood, blz. 298 in dit nummer.

[26] Acta Electronica **5**, no. 4, 1961, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 1*: G.-A. Boutry, Introduction (blz. 405-407). — H. Dormont en M. Auphan, Les phénomènes de bruit dans la détection du rayonnement infrarouge (blz. 427-458). — J.-J. Brissot en A. Dauguet, Les détecteurs actuels de rayonnement infrarouge (blz. 459-516). — F. Desvignes, Analyse du fonctionnement des détecteurs de radiations optiques (blz. 517-592).
Acta Electronica **6**, no. 1, 1962, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 2*: P. Billard, Les matériaux utilisables dans les systèmes optiques travaillant dans l'infrarouge, I. Généralités (blz. 7-64).
Acta Electronica **6**, no. 2, 1962, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 3*: P. Billard en J. Cornillault, Les matériaux utilisables dans les systèmes optiques travaillant dans l'infrarouge, II. Caractéristiques (blz. 73-169).
Acta Electronica **7**, no. 4, 1963, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 4*: R. Genève, Télévision dans l'infrarouge (introduction) (blz. 291-293). — F. Desvignes, Problèmes et techniques de la télévision en infrarouge (blz. 295-317). — J. Cornillault, Télévision infrarouge dans le domaine spectral situé au voisinage de 4 microns (blz. 319-360).
Acta Electronica **9**, no. 1, 1965, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 5*: J. Cayzac, Problèmes posés par la détection des faibles différences de température en télévision infrarouge (blz. 7-18). — C. Picot, Préamplificateurs pour appareils de prise de vues de télévision infrarouge (domaine spectral situé au voisinage de 4 microns) (blz. 19-34). — G. Marie, Préamplificateurs paramétriques adaptés à la détection de l'infrarouge (blz. 35-46). — M. C. Lefranc, Le refroidissement des détecteurs de rayonnement infrarouge (blz. 47-90).
Acta Electronica **11**, no. 3, 1968, *Cahier spécial „Infrarouge" no. 6*: G.-A. Boutry, Avant-propos (blz. 235). — P. Billard en C. Hily, Les systèmes optiques à champ étendu utilisables dans l'infrarouge (blz. 237-325).

[27] Acta Electronica **6**, no. 4, 1962, *Les phénomènes d'accumulation dans les photodiodes (premier cahier)*: F. Desvignes, Introduction (blz. 287-290). — H. Dormont en M. Valton, Théorie des photodiodes fortement dopées à jonction abrupte (blz. 291-339). — M. Robert, Les phénomènes d'accumulation dans les photodiodes. Cas particulier du germanium (blz. 341-407).
Acta Electronica **10**, no. 2, 1966, *Phénomènes d'accumulation dans les photodiodes (deuxième cahier)*: F. Desvignes, Introduction (blz. 121-122). — M. Berth en R. Petit, Tube analyseur d'images à mosaïque de germanium (blz. 123-135). — R. Petit, Problèmes d'optique électronique dans les tubes analyseurs d'images infrarouges (blz. 137-155). — M. Berth en C. Venger, Technologie des mosaïques de photodiodes (blz. 157-180). — P. Saget, Formation de mosaïques de jonctions de germanium *p-n* par épitaxie (blz. 181-194). — J. Revuz, Variation du facteur de contraste dans les cibles à mosaïque de jonctions (blz. 195-214).

[28] J. Borne en M. Audebert, Circuits de calcul utilisant des transistors et des tores magnétiques, Acta Electronica **5**, 219-236, 1961.

[29] J. Borne, M. Audebert, M. Martin en R. Goudin, Une machine à calculer de bureau électronique, Acta Electronica **8**, 203-239, 1964.

[30] J. Borne, Snelle drukkers voor digitale informatie verwerkende apparatuur, Philips techn. T. **29**, 213-226, 1968 (no. 7).

[31] J. Borne, Dispositif électronique d'aide à l'enseignement, Onde électr. **47**, 682-685, 1967.

[32] H. Bacchi en G. Eschard, Ultrasnelle fotografie, blz. 246 in dit nummer.

[33] Acta Electronica **10**, no. 1, 1966, *Les éléments pour lasers — technologie des monocristaux, spectres de fluorescence*: J.-J. Brissot, Préparation et propriétés des monocristaux destinés aux lasers (blz. 7-35). — A. Charles-Georges en A. Salmon, Taillage des monocristaux pour lasers (blz. 37-54). — Mme Lottin en J. Bonnefous, Les éléments lasers: contrôle des cristaux, finition optique et mesures (blz. 55-70). — J. Domain, Contribution à la réalisation d'un laser au néodyme (blz. 71-109).
Acta Electronica **10**, no. 3, 1966, *Lasers utilisant des matériaux actifs solides*: R. Genève, Introduction (blz. 227-232). — G. Marie, P. Wurtz en R. Le Pape, Etude d'un laser au néodyme déclenché par un obturateur à effet Pockels (blz. 249-293). — R. Dessert, Lasers „solides" à fonctionnement continu (blz. 295-314). — A. Charles-Georges en A. Salmon, Usinage de cavités de pompage pour lasers „solides" (blz. 315-330).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

[34] Acta Electronica **9**, no. 4, 1965, *Utilisation du rayonnement lumineux comme véhicule d'information*: P. Billard, J. Donjon en G. Marie, Application de la modulation de lumière aux télécommunications (blz. 305-313). — J. Donjon en G. Marie, Modulateurs de lumière à large bande utilisant l'effet Pockels (blz. 315-385).
[35] G. Marie, Televisieprojectie op groot formaat met een optische versterkbuis gebaseerd op het Pockels-effect, blz. 302 in dit nummer.
[36] G.-A. Boutry, J.-J. Brissot, R. Legoux, J. Périlhou en G. Piétri, Un tube convertisseur d'image pour l'infrarouge moyen „le Serval", Philips Res. Repts. **20**, 684-706, 1965.
[37] J.-J. Brissot, La technologie des semi-conducteurs monocristallins, Acta Electronica **1**, 187-200, 1956.
[38] J.-J. Brissot en H. Raynaud, Growing of single-crystal germanium in strips, Electrochem. Technol. **1**, 304-307, 1963.
[39] Monokristallen voor halfgeleider-schakelelementen en lasers, blz. 269 in dit nummer.
[40] J.-J. Brissot en A. Lemogne, Het kweken van monokristallen van cuprochloride, blz. 267 in dit nummer.
[41] R. Legoux, Vensters met een breed spectraal doorlaatgebied, blz. 300 in dit nummer.
[42] Een membraanzaagmachine, blz. 315 in dit nummer; Een kernboormethode voor nauwe gaten, blz. 317 in dit nummer.
[43] R. Evrard, Absolute micromanometers met diamagnetische levitatie, blz. 236 in dit nummer.

Samenvatting. Inleidend artikel voor dit nummer, dat geheel aan de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée (L.E.P.) is gewijd. Na een korte schets van de ontstaansgeschiedenis van dit Laboratorium, dat ongeveer 20 jaar geleden is opgericht, wordt de positie van een industrieel researchlaboratorium in het algemeen beschouwd. Aan de hand hiervan wordt de functie van het L.E.P. nader omschreven en het organisatorische verband waarin het Laboratorium werkt wordt verduidelijkt. Het arbeidsterrein van het Laboratorium ligt voornamelijk in het raakvlak van optica en elektronica, met als bijzonder belangrijke onderwerpen de foto-elektriciteit (fotomultiplicators, zonnebatterijen enz.), de televisie, microgolfbuizen en -systemen, het zien in het infrarood, informatieverwerking, snelle elektronica en elektro-optica. Een kort overzicht van belangrijke recente onderzoekingen en een uitvoerige bibliografie geven een beeld van het werk dat in de laatste jaren door het L.E.P. is gedaan.

Enkele eigenschappen van het oppervlak van zuivere alkalimetalen

G.-A. Boutry en H. Dormont

De ontwikkeling en verbetering van fotomultiplicators is van meet af aan een der belangrijkste werkgebieden van het LEP geweest. Sommige eigenschappen zoals responsiesnelheid, amplitudefluctuaties van het uitgangssignaal, opvangrendement van de gebruikte ingangsoptiek, enz. hangen van fysische verschijnselen af waarvan de mathematische analyse ver genoeg gevorderd is om ze voor berekening toegankelijk te maken. Dit is niet het geval voor het quantumrendement en ook niet voor de spectrale gevoeligheid van de foto-emitterende oppervlakken: hoewel het foto-emissie-effect ongetwijfeld het oudste bekende quantumverschijnsel is, wordt het nog steeds niet volledig begrepen, laat staan beheerst. De geschiedenis van de ontdekking en de verbetering van de beste foto-emitterende lagen is dan ook een aaneenschakeling van puur empirische vondsten, en met de klassieke hulpmiddelen van de vacuümtechniek blijft het een moeilijke taak, op afroep foto-emitterende lagen te produceren die niet te sterk van elkaar verschillen. Er is een overvloedige literatuur, waarin men talrijke metingen aantreft, maar met elkaar geven deze resultaten een verward beeld. Het lijkt er nog niet op dat men over een sluitende theorie van het foto-emissie-effect beschikt, en als deze theorie bestond zou het ondoenlijk zijn ze te toetsen aan de hand van de thans beschikbare experimentele resultaten.

Door het toegankelijk worden van het ultrahoogvacuüm is de situatie nu veranderd. Als we ervan uitgaan dat de moeilijkheden om oppervlakken met exact reproduceerbare eigenschappen te krijgen uitsluitend te wijten zijn aan verontreiniging hiervan door de moleculen van de restgassen, dan is het een redelijke schatting dat een oppervlak in een atmosfeer met een restdruk van 10^{-10} torr 10 000 × langzamer verontreinigd zal worden dan in een atmosfeer met de in normale elektronenbuizen aanwezige restdruk van 10^{-6} torr. Dit wordt door het experiment bevestigd. Als men b.v. in een atmosfeer met een restdruk van 10^{-7} torr lithium op een substraat opdampt in een zodanige opstelling dat onmiddellijk de secundaire emissie van het verkregen laagje kan worden gemeten, dan blijkt de waargenomen

Dr. H. Dormont, medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk. Dr. G.-A. Boutry, voormalig directeur van dit laboratorium, professor aan het Conservatoire National des Arts et Métiers te Parijs.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

secundaire-emissiecoëfficiënt vanaf een beginwaarde die onmiddellijk na het opdampen in de buurt van 0,8 ligt in 15 minuten tot de waarde 1,5 te stijgen [1]; in het vervolg van dit artikel zullen wij zien dat daarentegen bij een restdruk beneden 10^{-10} torr de eigenschappen van het oppervlak van alkalimetalen in het algemeen gedurende minstens een tiental uren stabiel blijven. Het leek ons dus dat het nu zaak werd te trachten betrouwbare experimentele resultaten te verzamelen waaraan men een toekomstige theorie van het foto-emissie-effect zou kunnen toetsen.

Gezien deze doelstelling, moest het eerste werk dat dat wij ter hand zouden nemen zich natuurlijk niet richten op de fotokatodes die tegenwoordig in de meeste elektronenbuizen worden toegepast. Immers, deze katodes bestaan uit lagen van gecompliceerde bouw en samenstelling, verkregen door opeenvolgende verdamping van verschillende elementen (antimoon, verscheidene alkalimetalen), waarop soms nog een oxidatie of een systematische dotering en in alle gevallen nog een ontlaatproces volgt. Veeleer moesten wij in eerste instantie onze aandacht op zo eenvoudig mogelijke foto-emitterende oppervlakken richten, dus op de oppervlakken van zuivere alkalimetalen. In deze metalen, die een ruimte-gecentreerd kubische kristalstructuur bezitten, is de koppeling tussen elektron en kristalrooster zo zwak dat het materiaal lijkt op een gas van nagenoeg vrije elektronen; een gevolg van de zwakke bindingskrachten is dat de foto-emissie in het zichtbare gebied van het spectrum en in het nabije ultraviolet optreedt, hetgeen de metingen vereenvoudigt. Bovendien is het een technisch voordeel dat de alkalimetalen zich goed ertoe lenen om door verdamping in vacuüm zeer zuivere metaallagen te maken. Enkele bijzonderheden van de hiervoor toegepaste methode zullen wij nu bespreken.

Vergeleken met de elementen in de aangrenzende kolommen van het periodieke systeem, hebben de alkalimetalen zeer hoge dampdrukken. Bij gegeven temperatuur neemt echter de dampdruk van cesium naar lithium regelmatig af. Heeft men derhalve bij cesium een temperatuur van 110 °C nodig om in een bepaalde opstelling in een uur tijds een laag van 3 μm dikte neer te slaan, dan moet men voor het verkrijgen van een zelfde laag in dezelfde tijd bij kalium de temperatuur opvoeren tot 160 °C, bij rubidium tot 125 °C en ten slotte bij natrium tot boven 230 °C. Nu hebben alle alkalimetalen de eigenschap dat zij glas aantasten, speciaal de normaal gebruikte glazen die tot de familie van de borosilicaatglazen behoren, en zoals bij alle chemische reacties neemt de mate van aantasting steil met de temperatuur toe. Men moet dus voor de temperatuur een geschikt compromis kiezen, en het gebied waarbinnen men dan moet blijven blijkt bij cesium heel breed te zijn, bij rubidium redelijk breed, bij kalium smal, terwijl voor natrium in het geheel geen compromis meer mogelijk is, tenzij men speciale glazen met bepaalde chemische eigenschappen hiervoor kiest.

De tot nu uitgevoerde experimenten zijn dan ook alleen met cesium, rubidium en kalium gedaan. Cesium hebben wij in het LEP bereid door cesiumdichromaat te reduceren met silicium, of door cesiumchloride in vacuüm met calcium te reduceren (methode van Hackspill). Het kalium werd in ampullen gekocht bij twee verschillende leveranciers, evenals het rubidium. In alle gevallen werd het alkalimetaal ontgast en gezuiverd door het enige malen in vacuüm te destilleren. Pas na al deze handelingen werd het in de experimentele opstelling gebracht, verhit, verdampt en neergeslagen op een vlak gepolijst glasoppervlak, dat met behulp van vloeibare stikstof op een temperatuur van 77 °K werd gehouden. Tijdens al deze behandelingen steeg de druk in de vacuümapparatuur nooit boven 10^{-10} torr. Het neerslaan van de lagen, ter dikte van enkele μm, gebeurde met een effectieve snelheid van 2 à 3 molecuuldikten per seconde. De experimentele procedure was dus voor alle drie metalen dezelfde; er was alleen een verschil in de verdampingstemperatuur en in de opening van het diafragma dat ter begrenzing van de bundel moleculen werd gebruikt.

Direct na de bereiding van een laag werd de spectrale foto-elektrische gevoeligheid ervan bij bestraling onder 45° gemeten, en wel eerst met natuurlijk licht en vervolgens met licht dat a) loodrecht en b) evenwijdig ten opzichte van het invalsvlak was gepolariseerd. De meetresultaten zijn in de *fig. 1*, *2* en *3* weergegeven (de verschillende punten horen bij verschillende cellen). De spectrale gevoeligheidskrommen zijn in deze figuren zo genormeerd dat hun maximum steeds bij 1,0 ligt. Bij onze proefomstandigheden vonden wij steeds dat de resultaten voor verschillende lagen uitstekend met elkaar klopten. Extrapolatie van de verkregen resultaten met behulp van de methode van Fowler leverde de in *tabel I* vermelde waarden voor de ware drempelgolflengte van de foto-emissie en de bijbehorende uittree-arbeid. Uit de spreiding van de meetresultaten menen wij te kunnen afleiden dat de onzekerheid in de uittree-arbeid in geen enkel geval groter dan 0,05 eV is en dat de waarschijnlijke fout van de orde van 0,02 eV is. De opgegeven waarden voor de uittree-arbeid zijn aanzienlijk groter dan die

Tabel I.

	drempel in nm	uittree-arbeid in eV
Cs	589,0	2,14
Rb	560,0	2,21
K	519,5	2,39

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

men in de literatuur vindt; hierover behoeft men zich niet te verbazen, aangezien de laatste bepalingen voor de alkalimetalen uit 1956 stammen. Wij menen dat de door ons gevonden waarden zeer dicht bij die voor het zuivere metaal moeten liggen.

Zoals gezegd, zijn de foto-emissie-eigenschappen van de lagen gemeten voor natuurlijk en voor gepolariseerd licht. In publikaties over dit onderwerp wordt er van-

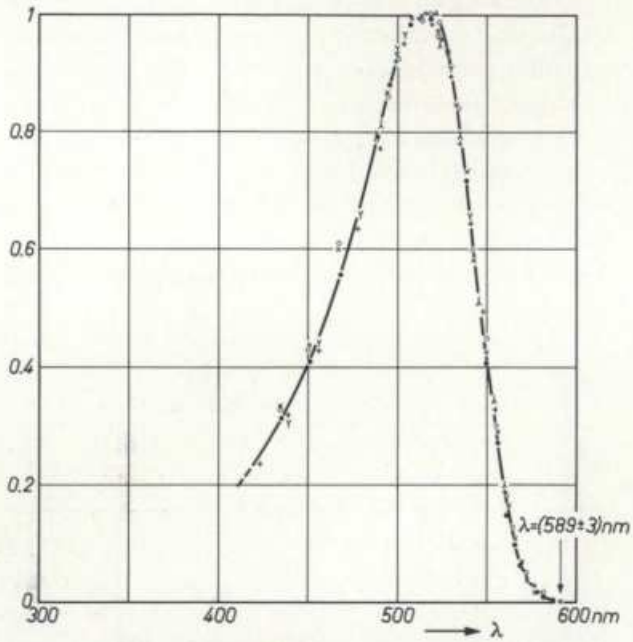


Fig. 1. Spectrale foto-elektrische gevoeligheid (fotostroom in willekeurige eenheden per eenheid van opvallende energie, als functie van de golflengte λ) van massief cesium bij 77 °K. Laagdikte 3,0 $\pm$ 0,2 micron.

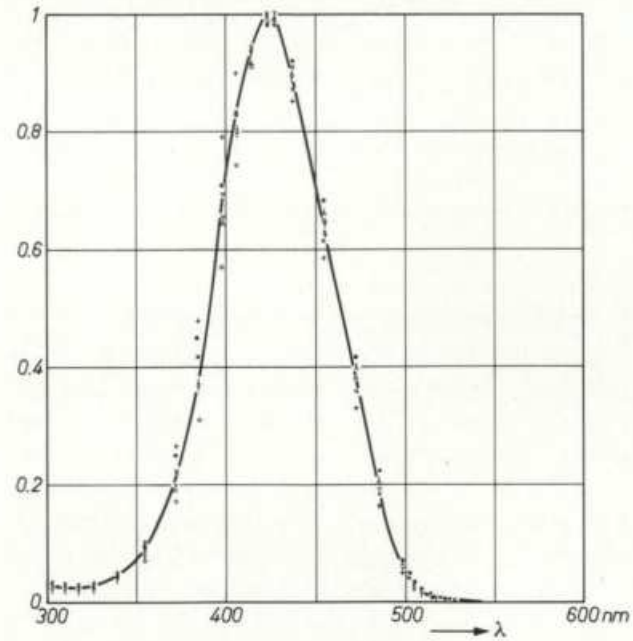


Fig. 2. Spectrale foto-elektrische gevoeligheid van massief kalium, als in fig. 1.

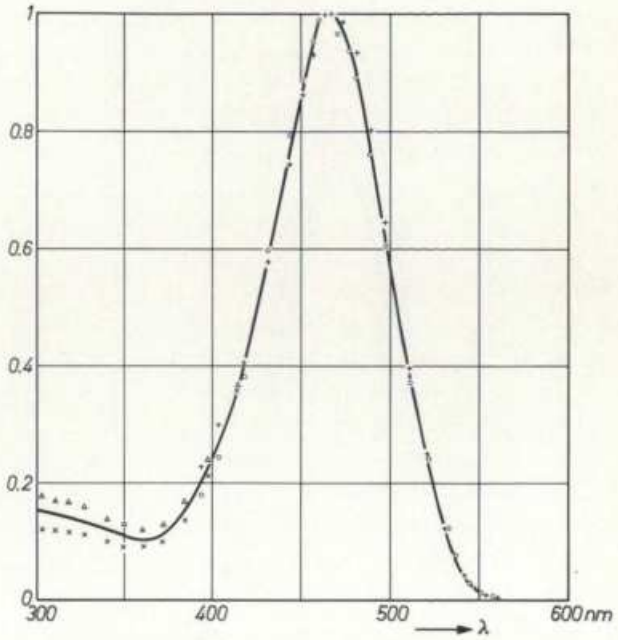


Fig. 3. Spectrale foto-elektrische gevoeligheid van massief rubidium, als in fig. 1.

ouds op gewezen dat bij de alkalimetalen een selectief effect bestaat dat zich in tweeërlei vorm manifesteert: a) Een spectrale selectiviteit, die daarin bestaat dat bij polarisatie van het invallende licht, zodanig dat de elektrische vector in het invalsvlak ligt, een maximum van de foto-emissie dicht bij de drempelgolflengte wordt gevonden — een eigenschap die men uitsluitend bij de alkalimetalen constateert. (Bij alle andere metalen neemt de spectrale gevoeligheid langzaam en vrijwel lineair met de frequentie toe, zodanig dat het maximum, als er een bestaat, in het verre ultraviolet gelegen moet zijn.) b) Een vectoriële selectiviteit, die daarin bestaat dat het zojuist beschreven effect volledig verdwijnt wanneer het polarisatievlak van het licht 90° wordt gedraaid.

Onze experimenten bevestigen weliswaar het bestaan van selectieve verschijnselen, maar wijzen erop dat de spectrale selectiviteit en de vectoriële selectiviteit wellicht niet twee aspecten van een enkel verschijnsel zijn, maar twee geheel verschillende verschijnselen die niet op dezelfde oorzaken berusten. Onze experimenten met gepolariseerd licht gaven nl. altijd en voor alle drie metalen krommen met een duidelijke spectrale selectiviteit, onafhankelijk van de oriëntatie van het polarisatievlak, indien de lagen bereid waren bij een temperatuur van 77 °K en op deze temperatuur werden gehouden. Hoewel de hoogte van het maximum van de ene laag tot de volgende of van de ene polarisatierichting tot de andere ongeveer 30% varieerde, konden de genormeerde curven alle tot dekking worden

[1] Persoonlijke mededeling van M. Blanchet van C.E.A., Saclay.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

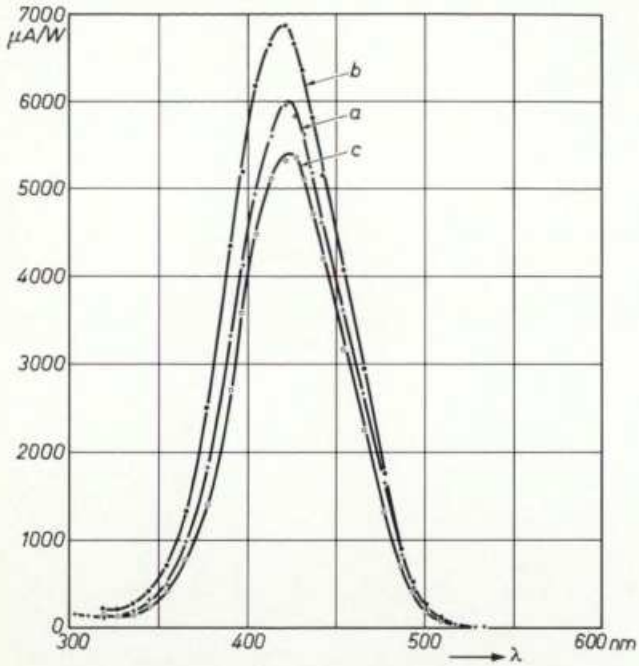


Fig. 4. Spectrale foto-elektrische gevoeligheid (fotostroom in μA/watt als functie van λ) van een kaliumlaag bij 77 °K, *a*) voor ongepolariseerd licht, *b*) voor evenwijdig gepolariseerd licht (elektrische vector evenwijdig met invalsvlak), *c*) voor loodrecht gepolariseerd licht.

gebracht. Dit is in *fig. 4* te zien voor kalium. Onder deze omstandigheden was er dus een duidelijke indicatie voor een spectrale selectiviteit, terwijl de vectorselectiviteit niet zeer geprononceerd was. De golflengten waarbij de maxima optraden zijn in *tabel II* vermeld.

Tabel II. Golflengte waarbij de maximale foto-emissie wordt verkregen, voor verschillende laagjes van zuivere alkalimetalen.

	gemeten waarden in nm	waarden uit de literatuur [*] in nm
Cs	505,0	540,0
Rb	467,5	475,0
K	425,0	439,0
Na	—	352,0

[*] Deze waarden zijn gemeten vóór 1936.

Deze meetresultaten gaven aanleiding tot een reeks, wederom speciaal aan kalium uitgevoerde, experimenten, waarbij de volgende cyclus werd doorlopen:

1) Er werd een laagje neergeslagen op een substraat dat op 77 °K werd gehouden, en de foto-elektrische gevoeligheid werd bepaald. De uitkomsten kwamen overeen met die van fig. 2 en fig. 4.
2) De plaat waarop het laagje was gevormd werd van 77 °K tot 195 °K verwarmd. Onmiddellijk na de verwarming werd weer de foto-elektrische gevoeligheid gemeten, en wel voor beide richtingen van de elektrische vector. De verkregen resultaten zijn weergegeven in *fig. 5*. Men ziet dat de spectrale gevoeligheidskrommen, die zeer goed reproduceerbaar zijn, geheel anders verlopen dan bij 77 °K. In overeenstemming met de bekende vectorselectiviteit is er geen maximum behalve wanneer de elektrische vector in het invalsvlak ligt. Bovendien ziet men dat weliswaar de drempelgolflengte in alle gevallen dezelfde is, maar dat het maximum van de spectrale gevoeligheid van ligging is veranderd.
3) Hierna werd de plaat weer tot 77 °K afgekoeld. Dit had geen verandering van de zojuist beschreven resultaten tot gevolg.
4) De plaat werd nu op 77 °K gehouden en er werd een nieuwe laag kalium opgedampt. Bij meting van de spectrale gevoeligheid in gepolariseerd licht werden zeer nauwkeurig weer de resultaten van fig. 4 verkregen.

De metingen volgens deze cyclus hebben wij ettelijke keren herhaald, altijd met dezelfde resultaten.

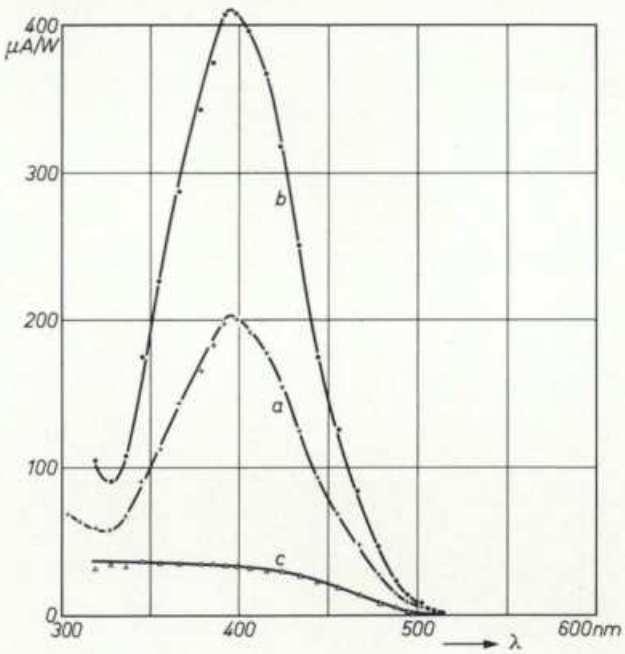


Fig. 5. Als fig. 4, maar bij een temperatuur van 195 °K. (Let op het verschil in ordinaatschaal.)

Een opmerkelijke bijzonderheid is dat althans in het geval van kalium de bij 77 °K neergeslagen laag een enigszins diffuse reflexie vertoonde, die echter in een zuiver spiegelende reflexie overging zodra de laag verwarmd werd. Tevens werd behalve de verandering in het verloop van de spectrale gevoeligheidskromme een sterke vermindering van de gemiddelde foto-elektrische gevoeligheid waargenomen: deze zakte tot ongeveer 1/20 van de oorspronkelijke waarde.

Hoewel uit deze experimenten nog geen bindende conclusies kunnen worden getrokken, schijnen zij

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toch erop te wijzen dat het bestaan van een maximum van het quantumrendement nabij de drempel van de foto-emissie een typische eigenschap van het alkalielement is, terwijl de vectorselectiviteit zoals deze in fig. 5 tot uitdrukking komt van de *structuur* van de emitterende laag schijnt af te hangen. Gezien dit mogelijke verband tussen de structuur van de lagen en hun foto-emissie-eigenschappen leek het ons gewenst de verdere onderzoekingen te wijden aan de eigenschappen van monokristallijne lagen van alkalimetalen. In het nu volgende gedeelte van dit artikel zullen we de bereiding van zulke lagen bespreken. De eigenlijke metingen van de foto-emissie zijn pas begonnen.

De monokristallijne lagen worden verkregen door epitactische groei, waarbij monokristallen van alkalihalogeniden als substraat voor de fotokatodes fungeren en waarbij het kristallisatieproces door diffractie van langzame elektronen wordt gecontroleerd. De experimentele procedure verschilt enigszins van de zojuist beschrevene, aangezien voor de epitactische groei de onderlaag een temperatuur moet hebben die slechts weinig beneden de smelttemperatuur van het verdampte metaal ligt. Het geheel speelt zich af in een hooggeevacueerd vat, waarin een elektronendiffractiecamera voor langzame elektronen is ondergebracht alsmede een houder waarmee het kristal kan worden verplaatst en waarmee zijn temperatuur van 77 °K (vloeibare stikstof) tot +100 °C (warme lucht) kan worden gevarieerd, en verder de verdampingsinrichting en de vereiste ovens voor het ontgassen (dat onmisbaar is als men een druk beneden 10^{-9} torr wil handhaven). Vóór de plaatsing in de vacuümklok worden de alkalihalogenide-kristallen in lucht gekloofd en vervolgens in het ultravacuüm zeer sterk ontgast. Gedurende de epitactische groei houdt men ze in de buurt van 0 °C, en de groei wordt geregeld onderbroken om een diffractieonderzoek uit te voeren.

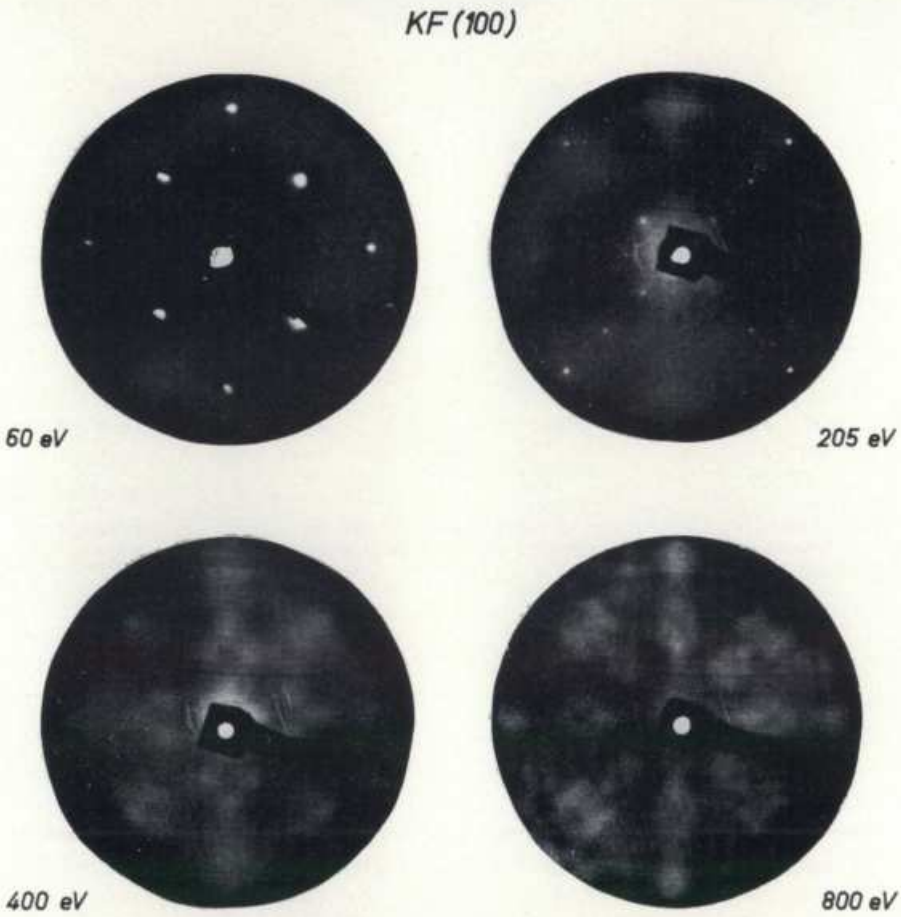


Fig. 6. Elektronendiffractiediagrammen van monokristallijn KF, dat als substraat voor de epitactische groei is gebruikt. De opnamen zijn gemaakt met verschillende elektronenenergieën.

Er zijn proeven gedaan met kalium, rubidium en cesium. Als substraat werden de alkalihalogeniden NaCl, KCl en KF gekozen, daar hun kristalrooster geschikt is en zij zich gemakkelijk laten kloven.

Bij het begin van het proces krijgt men het welbekende diffractiediagram van het substraat zelf; dit is voor KF in *fig. 6* weergegeven. Bij lage spanningen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

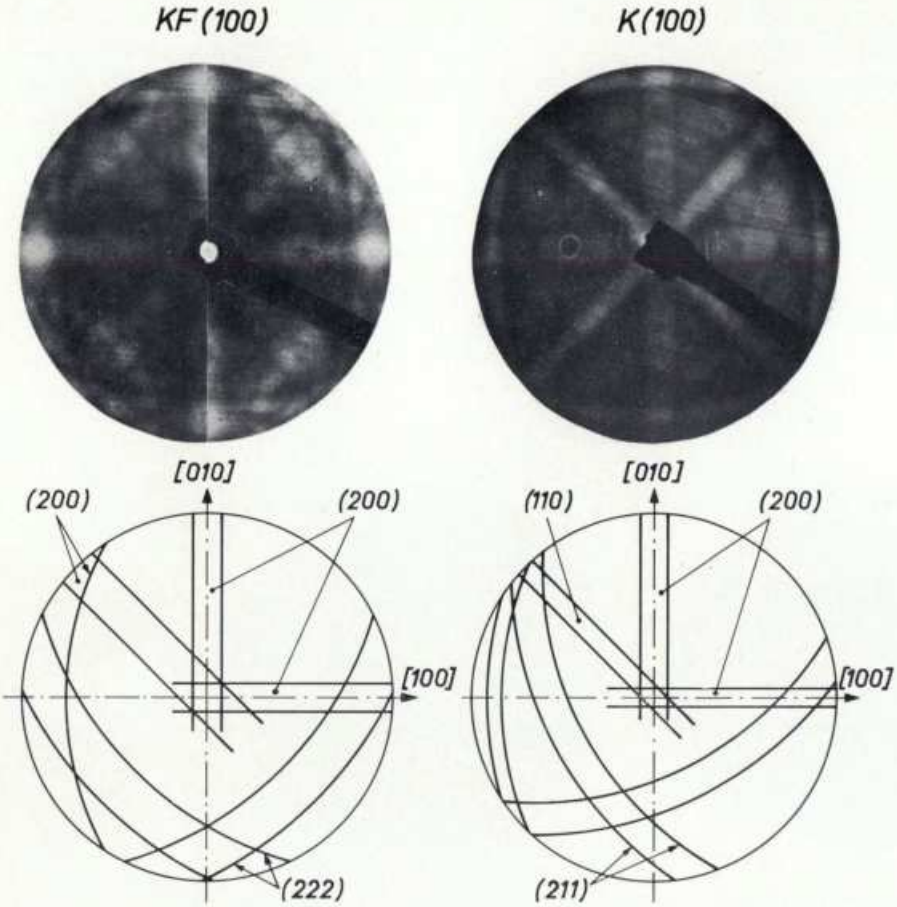


Fig. 7. Elektronendiffractiediagrammen, opgenomen met elektronen van 1000 eV, van het substraat KF (*links*) en van een hierop gegroeid laagje kalium (*rechts*). Onder de foto's zijn de Kikuchi-diagrammen getekend.

bestaat het diagram uit stippen en een zwakke gelijkmatige achtergrond; boven 100 eV krijgt men een patroon van lichte strepen in een donkere omgeving. Wordt de spanning dan verder opgevoerd, dan gaat het beeld over in een patroon van zg. Kikuchi-lijnen en banden, die ontstaan door verstrooide elektronen die Bragg-reflexie aan de kristalvlakken ondergaan. De ligging van al deze lijnen enz. beantwoordt nauwkeurig aan de eigenschappen van een vlakken-gecentreerd kubisch rooster met een roosterconstante gelijk aan die van KF en NaCl.

Gedurende het epitactische groeiproces kan men pas een diffractiediagram krijgen nadat verscheidene molecuullagen neergeslagen zijn. Het door de elektronen getroffen oppervlak wordt nl. geladen, hetgeen gemakkelijk te begrijpen is als men zich realiseert dat op het substraat aanvankelijk een niet-samenhangende laag wordt gevormd, die geen goede elektrische verbinding met aarde heeft en ten gevolge van de hoge secundaire emissiecoëfficiënt geen stabiele potentiaal kan aannemen. Zodra de neergeslagen metaallaag dik genoeg is, worden de ladingen afgevoerd en men krijgt de patronen die behoren bij de vlakken-gecentreerde kubische structuur van de epitactische laag. Men ziet deze echter slechts bij relatief hoge spanning; bij lage spanning is het patroon eenvoudig een continue ondergrond zonder enige stippen. Voert men de spanning op, dan beginnen inhomogeniteiten zichtbaar te worden, en bij ongeveer 400 eV vormen deze een symmetrisch patroon, dat aanzienlijk duidelijker wordt als men de laag tot ongeveer —100 °C afkoelt. Tussen 300 en 1000 eV kan men Kikuchi-lijnen waarnemen die goed passen bij de roostervlakken van het alkalimetaal dat men laat groeien.

Er doen zich twee duidelijk verschillende gevallen voor, naar gelang de elementaire cellen van het kristalrooster van een substraat goed of minder goed overeenstemmen met die van het alkalimetaal. Het eerste geval heeft men bij het groeien van kalium op KF: de elementaire cellen van de beide kristalroosters verschillen minder dan 1 % en de bijbehorende Kikuchi-diagrammen zijn weergegeven in *fig. 7*. Uit de lijnen en banden blijkt dat het metaal het (100)-vlak toont. Het tweede geval krijgt men als kalium en rubidium op NaCl groeien; men krijgt dan de diagrammen van *fig. 8*. De rechthoekige symmetrie hierin is kenmerkend voor het roostervlak (110), dat de grootste atoomdichtheid bezit.

We beschikken dus over een methode waarmee monokristallijne lagen van alkalimetalen kunnen worden vervaardigd zodanig dat men hetzij het (100)-vlak, hetzij het (110)-vlak ziet; dit is voor het bestuderen van het foto-emissie-effect van deze metalen bijzonder nuttig. De hiertoe vereiste metingen zijn pas begonnen en er zijn nog geen resultaten beschikbaar.

Het werk dat in dit artikel beschreven is vormt slechts een onderdeel van een veel uitgebreider programma van onderzoekingen over de fysica van oppervlakken, en in eerste instantie over de optische en elektrische eigenschappen van metaaloppervlakken. Bij deze onderzoekingen zal zeer veel werk verzet moeten worden, en de beste mogelijkheid hiertoe leek te worden gebo-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

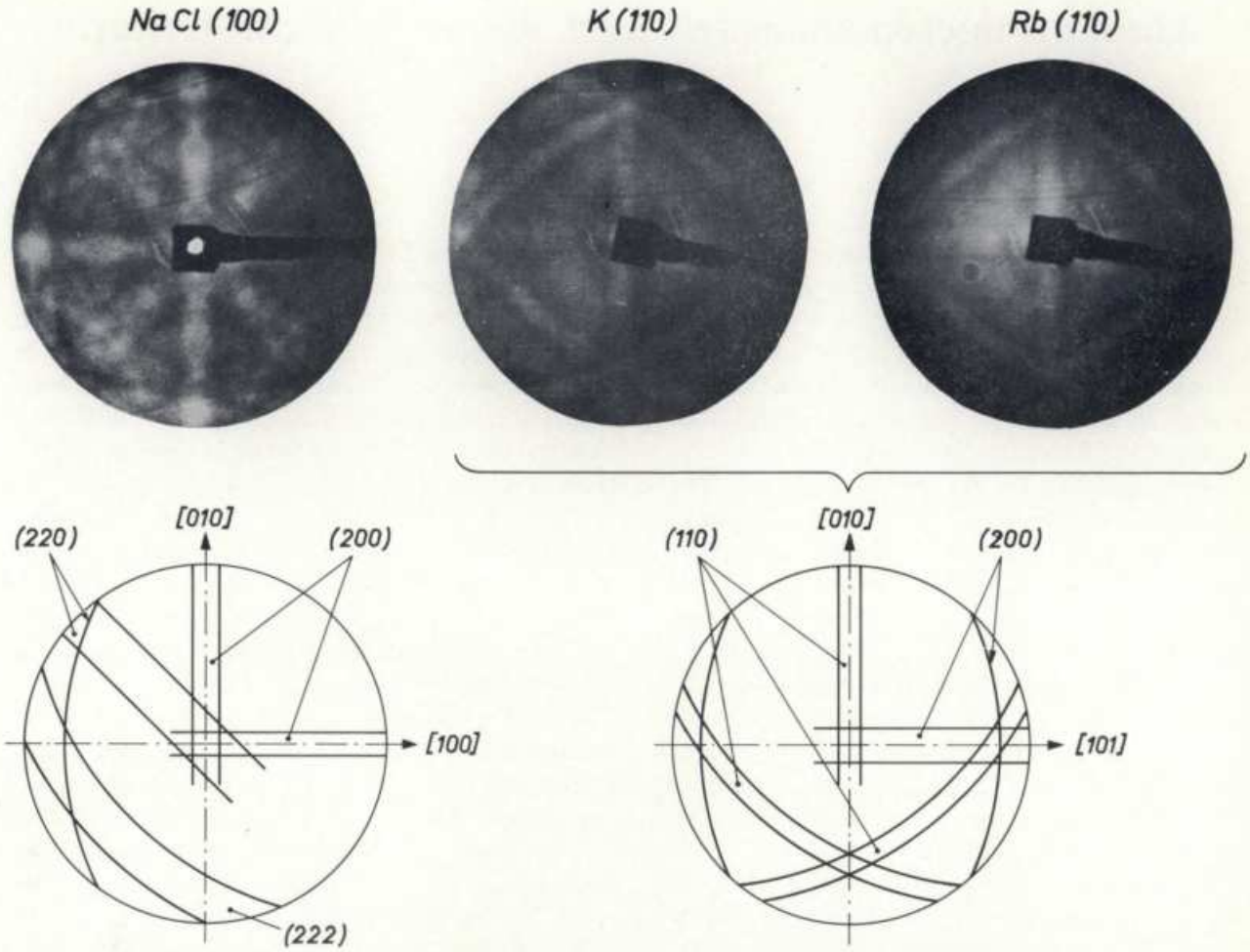


Fig. 8. Als fig. 7, voor het substraat NaCl (*links*) en voor opgegroeide laagjes van kalium en rubidium.

den door een samenwerking tussen industriële en universitaire laboratoria. Een dergelijke organisatie is inderdaad tot stand gebracht, waarbij twee groepen onder gemeenschappelijke leiding werken om hun werk zo goed mogelijk te kunnen coördineren. Binnenkort hopen wij verslag te kunnen uitbrengen over onderzoekingen betreffende de reflexiecoëfficiënt van de metaaloppervlakken waarvan hier de foto-elektrische eigenschappen zijn besproken.

Samenvatting. Het onderzoek van de foto-elektrische eigenschappen van dikke lagen van kalium, rubidium en cesium, gemeten in het ultrahoogvacuüm onder omstandigheden waarbij elke verontreiniging was uitgesloten, heeft tot de conclusie geleid dat de emissie samenhangt met de fysische structuur van het materiaal. Om monokristallijne metaallagen te kunnen verkrijgen, is een methode uitgewerkt voor de epitactische groei van alkalimetalen op alkalihalogeniden.

Literatuur (publikaties over de foto-emissie-eigenschappen van de oppervlakken van alkalimetalen):

J.-C. Richard, dissertatie C.N.A.M., 1963.
G.-A. Boutry, R. Evrard en J.-C. Richard, C.R. Acad. Sci. Paris **258**, 143, 1964.
G.-A. Boutry, H. Dormont, R. Evrard en R. Perrin, C.R. Acad. Sci. Paris **261**, 383, 1965.
R. Perrin, C.R. Acad. Sci. Paris **267B**, 58, 1968.
G.-A. Boutry, H. Dormont, J.-C. Richard en P. Saget, C.R. Acad. Sci. Paris **267B**, 255, 1968.
J.-C. Richard en P. Saget, Le Vide **22**, 99, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Absolute micromanometers met diamagnetische levitatie

R. Evrard

Met de hier te beschrijven apparaten kunnen de zeer zwakke krachten worden gemeten die in hoogvacuüm door de botsing van restgas-moleculen worden uitgeoefend. Het is bekend dat hierdoor de druk absoluut en passief kan worden bepaald, d.w.z. zonder voorafgaande ijking en zonder beïnvloeding van de eigenschappen van het restgas in kwestie.

De klassieke voor zulke metingen gebruikte systemen bevatten in het algemeen een beweeglijk gedeelte dat is opgehangen aan een zeer dunne, uiteraard tere en zeer trillingsgevoelige torsiedraad. De meting berust erop dat een evenwicht wordt bereikt tussen het torsiekoppel van de draad en een koppel dat door de moleculaire botsingen wordt veroorzaakt. Verhoging van de gevoeligheid is slechts mogelijk door een nog dunnere ophangdraad te gebruiken. Men is hiermee reeds vrijwel tot aan de grens van het mogelijke gegaan, en kan dan drukken van ca. 10^{-7} torr meten; veel lager kan men niet komen.

In het LEP is nu een opstelling ontwikkeld die tienduizend maal gevoeliger is. Deze opstelling bevat een beweeglijk gedeelte dat door levitatie in het vacuüm vrij zwevend wordt gehouden, dus zonder enig mechanisch bevestigingsmiddel.

Levitatie in een stabiele toestand kan zonder gebruikmaking van een ingewikkeld besturingssysteem alleen bereikt worden met *diamagnetische* lichamen, die men hiertoe in een magnetisch veld van geschikte configuratie en sterkte plaatst. In feite heeft alleen grafiet een voldoende susceptibiliteit om met praktisch in aanmerking komende velden de levitatie te realiseren. In onze opstelling werken we met een zeer dun schijfje van polykristallijn grafiet (dikte 50 μm) dat vrij zwevend wordt gehouden in een divergerend magnetisch veld ter sterkte van 1 tesla (10^4 gauss). (Om redenen die hieronder worden toegelicht maken wij geen gebruik van pyrolytisch grafiet, dat onder bepaalde voorwaarden door minder sterke velden zwevend gehouden kan worden.)

Het schijfje zweeft in verticale stand in de luchtspleet van een elektromagneet, waarvan het veld rotatiesymmetrisch rond een verticale as is. Het schijfje kan zonder enige mechanische demping vrij draaien om zijn verticale diameter, die samenvalt met de symmetrieas van het veld. Met dit schijfje heeft men derhalve een ideaal beweeglijk element met zeer gering traagheidsmoment, dat vrij draait om een niet-materiële as. In de hierna te beschrijven opstellingen veroorzaken nu de botsingen van de moleculen een koppel op de schijf dat evenredig is met de druk. Door bepaling van de verandering in hoeksnelheid van de schijf meet men de door het koppel verrichte arbeid, geïntegreerd over een groot aantal omwentelingen. De gevoeligheid kan aanzienlijk groter zijn dan in het geval van statische metingen, waarop men bij het gebruik van systemen met mechanische ophanging aangewezen is; we hebben aldus krachten van de orde van 10^{-15} newton kunnen aantonen (10^{-13} gram-kracht).

Volgens deze grondgedachte hebben we nu verschillende uiterst gevoelige toestellen voor passieve en absolute drukmeting ontwikkeld. Het met de geëvacueerde ruimte verbonden meetvat wordt in de luchtspleet van een elektromagneet geplaatst. De zwevende grafietschijf wordt met behulp van een roterend magnetisch hulpveld aan het draaien gebracht, waarna men het hulpveld wegneemt. Bij het eerste type toestel neemt men eenvoudig de vertraging van de beweging door de botsingen van de moleculen waar; we noemen dit type toestel een moleculaire manometer. Is de aard van het restgas bekend, dan kan men de waarde van de druk p als volgt berekenen. Zij H het traagheidsmoment van de schijf, M zijn massa en R zijn straal. Door het remmende koppel T, dat op de schijf werkt, verandert de hoeksnelheid ω van de schijf met de tijd t volgens de betrekking:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T}{H} = -14{,}24\,\frac{R^2\omega}{M\bar{v}}\,p\,.$$

Daarbij is $\bar{v}$ de gemiddelde snelheid van de moleculen van het betrokken gas. Over de afleiding van de formule slechts het volgende. Elk element van de schijf beschrijft een beweging loodrecht op het vlak van de schijf. Het remmende koppel ontstaat doordat een oppervlakte-element dat de moleculen tegemoet draait meer botsingen ondervindt dan het tegenovergelegen element dat de moleculen „ontvlucht". Van welke aard de botsingen zijn, is daarbij van weinig belang, de zuiver kinetische theorie is vrijwel streng geldig. De gevoeligheid is bij dit type manometer beperkt tot 5×10^{-7} torr.

Het tweede type toestel, de „thermo-moleculaire" manometer (*fig. 1*), is aanzienlijk gevoeliger. Hier draait

R. Evrard, medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

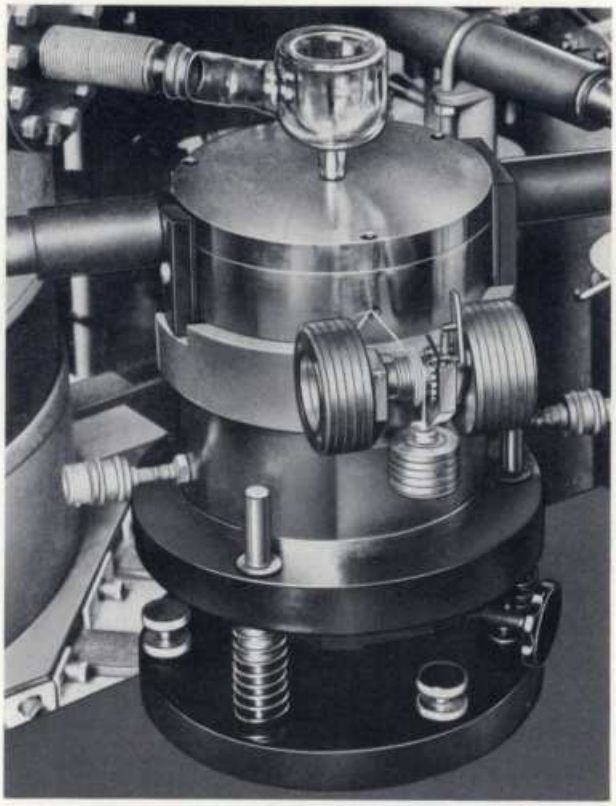


Fig. 1. Experimentele uitvoering van de thermo-moleculaire manometer.

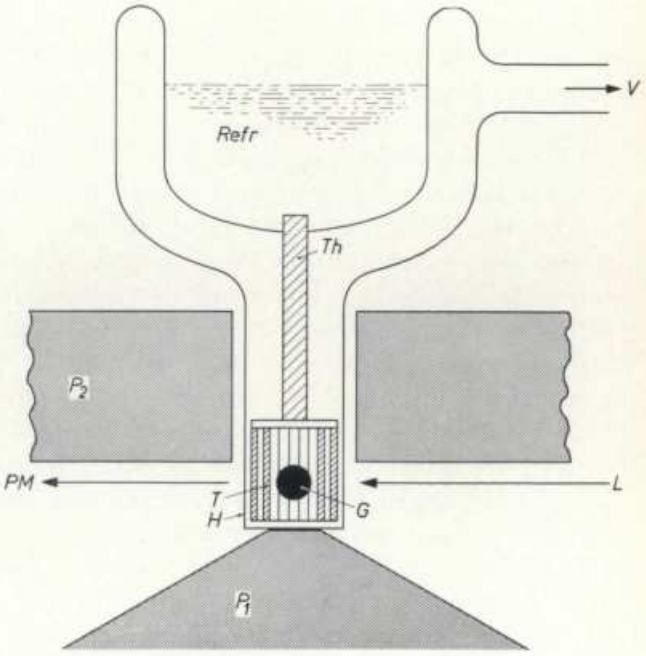


Fig. 2. Doorsnede van de „thermo-moleculaire manometer". *G* grafietschijf, vrij zwevend in het magneetveld tussen de poolschoenen P_1, P_2. *V* geëvacueerd vat waarin men de druk wil meten. *T* stator met schoepen. *Th* thermische geleider. *Refr* koelmiddel. *L* lichtbron. *PM* fotomultiplicator.

de schijf binnen een soort kooi van metalen schoepen, die onder een bepaalde hoek zijn opgesteld (*fig. 2* en *3*). Deze kooi, die geïsoleerd is van de wanden van het vat, wordt door middel van een thermisch geleidende, aan een koudebron verbonden, staaf gekoeld tot een temperatuur Θ_2. Sommige „warme" moleculen, afkomstig van de op omgevingstemperatuur Θ_1 gehouden wanden van de manometer, treden de afgekoelde kooi binnen, doorlopen deze zonder botsingen en treffen het schijfje; zij kunnen echter, dank zij de afschermende werking van de schoepen, van elke zijde van de schijf slechts één helft treffen (fig. 3). Hierdoor ontstaat een koppel dat evenredig is met de totale druk. Men vindt:

$$T = Cp\left(1 - \sqrt{\frac{\Theta_2}{\Theta_1}}\right);$$

hierbij is C een van de configuratie afhangende factor, die men kan berekenen.

Het geheel werkt als een soort molecuulstraalturbine. De schijf vormt een ideale rotor, zonder lagers en met een zeer gering traagheidsmoment, de afgekoelde kooiconstructie vervult de rol van de stator, en de wand is de warmtebron van de machine.

Om de door het koppel verrichte arbeid en daarmee de druk van het gas te bepalen, behoeft men slechts gedurende een bepaalde tijd — die men langer kiest naarmate men een grotere gevoeligheid wenst — de

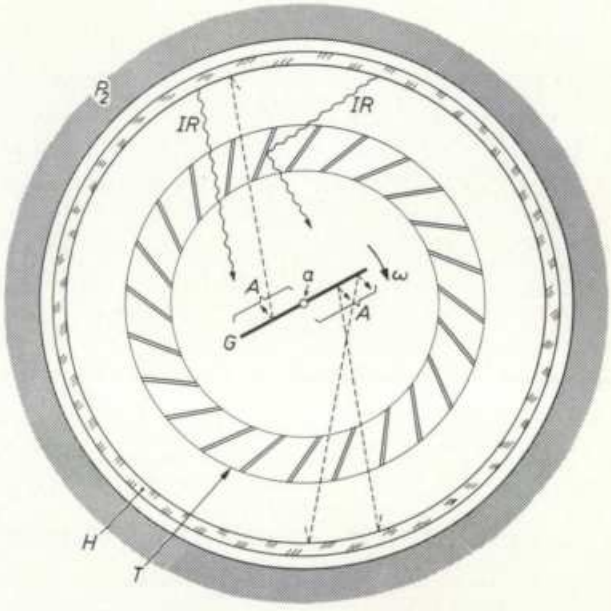


Fig. 3. Dwarsdoorsnede van het eigenlijke meetgedeelte. *G* vrij zwevende grafietschijf, volgens de pijl draaiend om verticale as *a* met hoeksnelheid ω. P_2 poolschoen. *H* warme wand van manometervat. *T* stator met gekoelde schoepen. Door de plaatsing van de schoepen onder een bepaalde hoek kunnen de van *H* komende moleculen de grafietschijf alleen op de hen tegemoetkomende oppervlakken *A* treffen. De achterkant hiervan zouden zij alleen via reflexies aan de schoepen kunnen bereiken, bij botsing tegen een (koudere) schoep geven zij echter hier reeds grotendeels hun energie af. Het resultaat is een remmend koppel op de schijf. De stralingsdruk van de door *H* uitgezonden infrarode straling daarentegen levert geen noemenswaardig netto-koppel, daar deze door de reflexie aan de schoepen vrijwel uniform over de grafietschijf wordt verdeeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verandering van de hoeksnelheid van de schijf te meten. Het meetgebied voor de druk kan overigens aanzienlijk uitgebreid worden door verlaging van de temperatuur van de koudebron.

De metingen gebeuren automatisch. We laten daartoe de draaiende schijf een lichtstraal periodiek onderbreken. De lichtimpulsen vallen op een fotocel, en de stroomstoten worden aan een kleine computer toegevoerd, die rechtstreeks de waarde van de versnelling of vertraging aangeeft. Deze is evenredig met de druk. De grenswaarde van de gevoeligheid blijkt bij 10^{-10} torr te liggen, maar zou zeker nog minstens een orde van grootte verbeterd kunnen worden. In principe is de gevoeligheid groter naarmate men de meting langer maakt (zoals al aangestipt), maar men kan haar niet willekeurig groot maken, daar verschillende parasitaire krachten optreden die niet afhangen van de druk. B.v. zendt de warmtebron infrarode stralen uit, die op dezelfde wijze op de schijf werken als de moleculen en een koppel uitoefenen dat aan de „stralingsdruk" beantwoordt. Dit parasitaire koppel, dat men wellicht geneigd is als verwaarloosbaar te beschouwen, kan, als men geen maatregelen neemt, het thermo-moleculaire koppel reeds bij drukken lager dan 10^{-8} torr geheel overschaduwen. We hebben het effect van deze stralingsdruk sterk kunnen reduceren door de oriëntatie van de statorschoepen op grond van berekeningen zo te kiezen dat de infrarode straling die de schijf treft meer gelijkmatig wordt verdeeld door medewerking van weerkaatste straling (zie fig. 3).

De andere parasitaire remeffecten, die voortvloeien uit het feit dat het veld niet volkomen symmetrisch is, kunnen verwaarloosd worden. Dit is *niet* het geval als men pyrolytisch grafiet zou gebruiken. De levitatie van schijfjes van deze monokristallijne variëteit kan met betrekkelijk zwakke velden bereikt worden, zij het slechts bij bepaalde configuraties (ringvormige rotor in toroïdale luchtspleet). Het traagheidsmoment van de rotor valt dan echter nogal groot uit en vooral worden de parasitaire koppels te groot; deze uitvoering brengt trouwens op het ogenblik nog andere bezwaren met zich mee.

Het belangrijkste voordeel van de hierboven beschreven meetmethodes is hun passiviteit: bij de toepassing ervan wordt het te meten vacuüm vrijwel niet verstoord, in tegenstelling tot wat b.v. bij de ionisatiemanometer het geval is.

De micromanometers met diamagnetische levitatie zijn dus van nature aangewezen voor onderzoekingen in het ultrahoogvacuüm, waarbij elke wisselwerking tussen het restgas en de meetapparaten vermeden dient te worden. Daar men hiermee bovendien absoluut kan meten, kunnen zij voor de ijking van andere soorten manometers worden gebruikt.

De fabricage van deze apparaten is thans ter hand genomen door Radiotechnique Compelec.

Samenvatting. Met behulp van diamagnetische levitatie is het gelukt een buitengewoon gevoelige drukmeter te construeren. Hierbij wordt een dun grafietschijfje toegepast dat vrij in een magnetisch veld zweeft en onbelemmerd kan roteren om zijn verticale diameter, die samenvalt met de as van het, rotatiesymmetrische, magneetveld. Bij zijn draaiing ondervindt het schijfje een remmend koppel door de botsingen met de moleculen van het omringende gas. Er is een opstelling gemaakt waarbij men eenvoudig de wanordelijke warmtebeweging van de moleculen gebruikt, en een tweede, veel gevoeliger, opstelling, waarbij dank zij een vaststaand gekoeld schoepenrad rondom de schijf alleen moleculen met geschikte bewegingsrichting werkzaam zijn. In beide gevallen wordt uit de vertraging van de rotatiesnelheid, d.w.z. uit de arbeid die de remmende koppels verrichten, de absolute waarde van de druk bepaald. De grenswaarde van de gevoeligheid van de tweede opstelling ligt bij 10^{-10} torr.

De transfertechniek, een nieuwe methode voor de formering van fotokatodes

R. Legoux

Bij het vervaardigen van een foto-elektrische buis komt, behalve het maken en monteren van de onderdelen, het pompen en het ontgassen, nog een zeer essentiële bewerking te pas: het formeren van de fotokatode. Hierdoor wordt een emitterende laag verkregen die de gewenste foto-elektrische eigenschappen bezit.

Volgens de klassieke werkwijze wordt een dergelijke laag tot stand gebracht door met behulp van een nauwkeurig geprogrammeerde verhitting één of meer alkalimetalen te verdampen en „in situ" met andere stoffen

R. Legoux, medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

te doen reageren. De laatstgenoemde worden vooraf of tijdens het proces opgedampt. Het meest maakt men hierbij gebruik van zilver en, nog belangrijker, van antimoon.

Tijdens deze behandeling beïnvloeden de alkalimetalen, die door de hele buis heen diffunderen, vaak door fysisch-chemische processen de toestand van de elektrodeoppervlakken binnen de buis, waardoor de eigenschappen en prestaties van de buis achteruitgaan. Bovendien brengt het feit dat men de stoffen die voor de formering van de fotokatode nodig zijn „in situ" produceert de noodzaak mee om bronnen die deze stoffen leveren permanent in de buis onder te brengen, en wel op plaatsen waar zij het functioneren van de buis niet belemmeren. Hierdoor kan men de afmetingen van de buis vaak niet zo klein kiezen als men zou willen, en de ontwikkeling van moderne buizen van zeer ingewikkelde bouw of bijzonder kleine afmetingen wordt er ten zeerste door bemoeilijkt.

Ten slotte hangen als gevolg van de beschreven methode de bereikbare eigenschappen van de fotokatodes (totale gevoeligheid, uniformiteit van de gevoeligheid over het oppervlak, spectrale gevoeligheid) alsook de reproduceerbaarheid van de gewenste waarden en de uitval bij de fabricage vaak van de inwendige bouw van de buizen af, die immers de diffusie van de verdampte reagentia beïnvloedt.

Al deze moeilijkheden, die men bij de behandeling van de buizen naar de klassieke methode geregeld tegenkomt, kunnen worden uitgeschakeld door toepassing van een nieuwe werkwijze, de „transfermethode"[1]. Hierbij wordt de buis in zijn geheel in een hooggeëvacueerd vat geplaatst (*fig. 1*). Het venster *F*, waarop de foto-emitterende laag wordt aangebracht, is hierin afzonderlijk, gescheiden van de rest van de buis *T*, opgesteld. Bij de formering van de fotokatode wordt uitsluitend dit venster aan de dampen van de verschillende constituerende stoffen blootgesteld. De verschillende bronnen die de dampen leveren zijn in een hulpvat *E* bijeen geplaatst; zij worden tegenover het oppervlak van het venster gebracht en gedurende het gehele proces van de formering in deze positie gehouden, waarna men ze weer verwijdert. Na stabilisatie van de fotoemitterende laag wordt het venster door een koude las verbonden met de rest van de buis, die naar het venster toe gebracht wordt; deze verplaatsing en de vereiste druk voor de koude las worden teweeggebracht door middel van de schroefspil *V*.

De methode heeft talrijke voordelen. We noemen speciaal de volgende:

a) Men kan de buizen in geheel open toestand pompen en ontgassen en men behoeft niet te vrezen dat er later weer een hogere druk in de buis zal ontstaan, zoals vaak het geval is bij pompen door een nauwe pompstengel.

b) Men kan geheel onbelemmerd en op behoorlijke afstand van de andere gedeelten van de buis werken, die aan de vaak schadelijke inwerking van het vormingsproces onttrokken blijven. Met name geldt dit voor de fluorescentieschermen van beeldbuizen, voor steunpo-

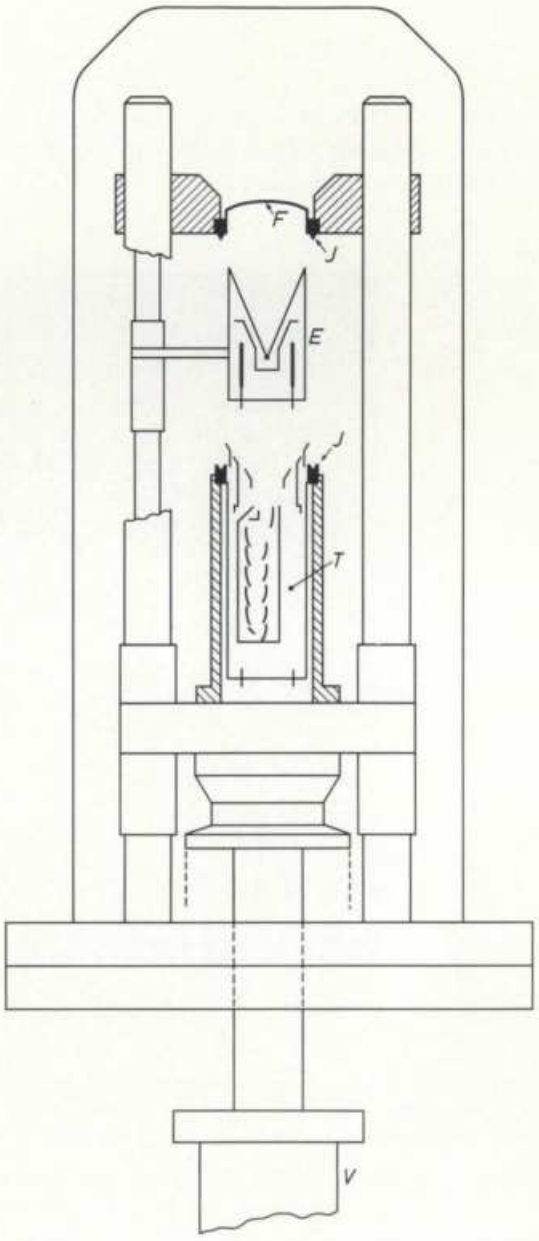


Fig. 1. Schema van een opstelling voor de formering van fotokatodes volgens de transfermethode. Het hulpvat *E*, waarin zich de verdampingsbronnen voor de formering bevinden, kan in verticale en horizontale richting worden verplaatst zodat het tegenover het venster *F* kan worden gebracht, waarbij een vrijwel afgesloten ruimte wordt gevormd. Na de formering verwijdert men het hulpvat weer en laat door middel van de schroefspil *V* het onderste gedeelte van de buis *T* omhoog komen, om aan de randen *J* een druklas teweeg te brengen die buis en venster verbindt.

[1] De methode is beschreven in een voordracht van P. Dolizy en R. Legoux op het 4e Symposium over Photoelectronic image devices, Londen, september 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

len die zeer goede isolerende eigenschappen moeten behouden, en voor elektrodes waarvan de passieve rol in het gedrang zou komen door veldemissie of een parasitaire foto-elektrische emissie, die kunnen optreden indien er op het oppervlak een metaal met lage uittreearbeid terechtgekomen is.

niet de gewenste eigenschappen vertoont. Ten slotte is het een belangrijk voordeel van de transfermethode dat men hiermee buizen kan vervaardigen die volgens de klassieke methode in het geheel niet of niet goed genoeg konden worden gemaakt vanwege het feit dat de gewenste configuratie of afmetingen van de buizen

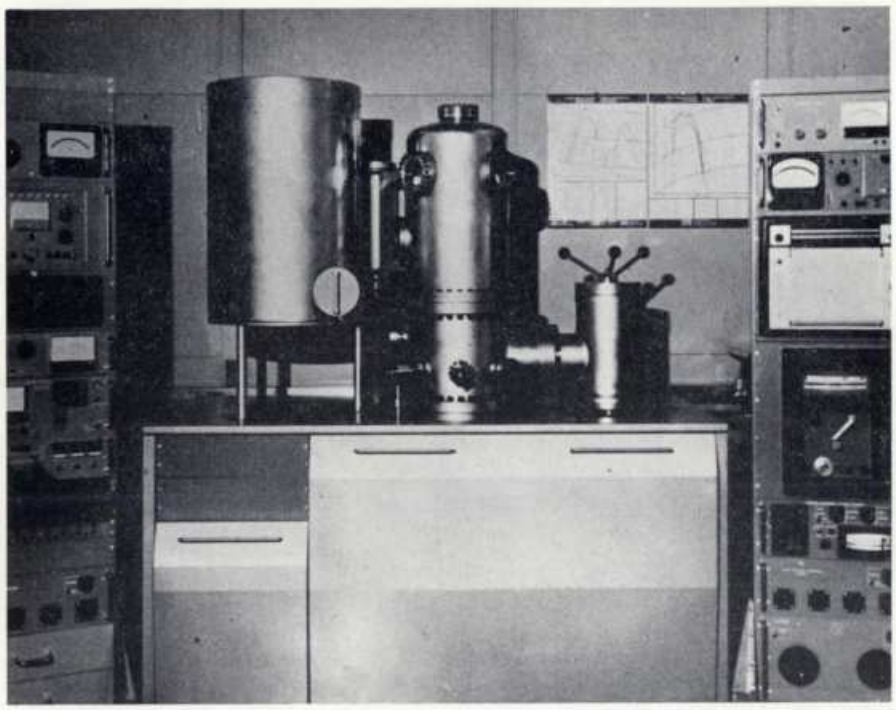


Fig. 2. Volledige opstelling voor de transfermethode.

Met de nieuwe methode kan men foto-elektrische eigenschappen realiseren die geheel vergelijkbaar zijn met die verkregen volgens de klassieke methodes. Met foto-emitterende laagjes van drie alkalibestanddelen op een glazen of metalen onderlaag hebben wij gevoeligheidswaarden van meer dan 200 μA/lm kunnen krijgen; tevens kan een geringere spreiding van de spectrale eigenschappen worden gerealiseerd dan vroeger, en een betere uniformiteit van de emissie van de laagjes, dank zij het feit dat men bij het formeren van de fotokatode de verdampingsbronnen op grotere afstand kan plaatsen en daardoor een gelijkmatiger neerslag kan verkrijgen. Daar men tijdens het proces de foto-elektrische emissie doorlopend kan controleren, is men in staat de eigenschappen van de fotokatode van te voren te beoordelen en alsnog te beslissen of deze al dan niet met de buis waarvoor hij bestemd was moet worden verbonden. Het behoeft dus niet meer voor te komen dat men volledige buizen, die vaak zeer kostbaar zijn, speciaal wanneer het om prototypes gaat, tot uitval moet verklaren alleen omdat de fotokatode niet voldoende plaats boden voor het formeren van een fotokatode.

In *fig. 2* ziet men een in dit laboratorium gebouwde volledige opstelling voor de vervaardiging van buizen volgens de transfermethode. De fotokatode kan hierbij een nuttige diameter van 120 mm, de hele buis een uitwendige diameter van 180 mm hebben. In deze opstelling kan een vacuüm van 1 tot 5×10^{-9} torr worden bereikt.

Samenvatting. De moeilijkheden waarmee men bij de fabricage van foto-elektrische buizen volgens klassieke methodes geregeld te kampen heeft, kunnen grotendeels worden vermeden door toepassing van de zg. transfermethode. Hierbij wordt de buis voor het formeren van de fotokatode in een speciaal ontwikkelde opstelling geplaatst. Het formeren gebeurt hier zodanig dat uitsluitend het venster waarop de foto-emitterende laag moet worden aangebracht aan de dampen van de verschillende samenstellende stoffen wordt blootgesteld. De verschillende bronnen die deze dampen leveren worden in de opstelling tegenover de te bedampen onderlaag gebracht en gedurende het gehele formeringsproces in deze positie gehouden. Na stabilisatie van de foto-emitterende laag worden de bronnen verwijderd en het venster wordt binnen de opstelling in contact gebracht met de buis en door een koude las hiermee verbonden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fotomultiplicators en de transfertechniek

J. Nussli

Sedert geruime tijd wordt door het LEP in nauwe samenwerking met de fabriek Hyperélec te Brive-la-Gaillarde gestreefd naar steeds verdere verbetering van de eigenschappen van fotomultiplicators.

Als lichtdetectors zijn deze buizen zowel wat gevoeligheid als wat snelheid betreft nauwelijks te overtreffen, en hierop berust hun toepassing voor de waarneming van scintillaties die door kernstralingen in transparante materialen worden veroorzaakt. Ze nemen hierdoor in het kernfysische instrumentarium zowel voor industrieel als voor laboratorium-gebruik een zeer bijzondere plaats in, evenals op het gebied van de fotometrie in het algemeen. Daar de fysici hun eisen steeds hoger opschroeven, is er alle reden om het onderzoek over fotomultiplicators onverminderd voort te zetten, te meer daar er zich thans ook geheel nieuwe toepassingsmogelijkheden voordoen, zoals in het astronomisch werk met satellieten en het werk met lasers.

Een overzicht van de tot heden verrichte onderzoekingen over de eigenschappen van dit soort buizen is onlangs in dit tijdschrift verschenen [1]. Wij zullen ons hier beperken tot een bespreking van de belangrijke bijdrage die tot de verbetering van de fotomultiplicators geleverd wordt door de transfertechniek, een nieuwe methode voor het activeren van fotokatodes [2]. Het belangrijkste voordeel dat men door deze techniek behaalt is een vermindering van de donkerstroom, dank zij een aanzienlijke vermindering van de veldemissie die ontstaat door neerslag van alkalimetalen op alle elektrodes van de fotomultiplicator.

Door deze vermindering van de veldemissie worden ook uitvoeringen van buizen mogelijk die met hoge spanningen en sterke velden werken — iets wat men tot dusver slechts schoorvoetend durfde toe te passen. Met zulke buizen kunnen betere eigenschappen worden verkregen wat betreft amplitudefluctuaties en responsiesnelheid.

Fotomultiplicators van het conventionele type

Bij de conventionele fotomultiplicator wordt het door de fotokatode geleverde signaal versterkt door een lawineproces, dat zich afspeelt aan een reeks secundaire-emissiedynodes. Om de nieuwe ontwikkelingen toe te lichten, moeten we eerst enkele in het aangehaalde artikel [1] besproken feiten recapituleren.

In de meeste buizen is de donkerstroom veel sterker dan de thermische emissie van de katode; de thermische emissie is er altijd, maar hij vormt als regel slechts een klein deel van de waargenomen stroom. Voor vele soorten buizen zal derhalve de fabrikant de constructie speciaal moeten aanpassen aan de nodige beperking van de ruis. De thermische emissie van de gebruikelijke katodes ($SbCs_3$ of Sb-K-Cs) is van de orde van 10 elektronen per cm^2 en per seconde. De belangrijkste bijkomende stroombron is de veldemissie, die niet aan de katode wordt opgewekt — daar zijn nl. de veldsterkten slechts gering — maar op willekeurige plaatsen in de buis, op oneffenheden en stofdeeltjes, die men niet volledig kan vermijden. De hierdoor geëmitteerde elektronen worden meestal niet direct naar het werkzame oppervlak van een dynode versneld, waar zij door secundaire emissie zouden worden vermenigvuldigd, doch veeleer naar willekeurige andere oppervlakken, zoals de achterzijde van de dynodes, verbindingsleidingen, isolatoren, waar zij de emissie van licht of van zachte röntgenstralen veroorzaken. De aldus geëmitteerde licht- en röntgenfotonen kunnen dan de katode of de eerste dynodes treffen, waar zij de emissie van foto-elektronen of van pakketten van foto-elektronen veroorzaken.

Dat de veldemissie van de oneffenheden vrij sterke stromen kan veroorzaken (10^{-9} tot 10^{-12} A), moet worden toegeschreven aan de zeer kleine uittree-arbeid (b.v. 1,5 eV) van metaaloppervlakken die een dun laagje alkali hebben geabsorbeerd (vooral cesium). De aanwezigheid van dit laagje, dat door een zeer sterke affiniteit aan het metaal is gebonden (de affiniteit is zelfs sterker dan die welke de stabiliteit van de fotokatode waarborgt), is te wijten aan de hoge alkalidampdruk die in de buis heerst tijdens de activering van de katode. Bij de transfertechniek echter wordt de activering in een nevenruimte binnen de vacuümklok uitgevoerd en alleen het venster van de buis wordt aan de hoge alkalidampdruk blootgesteld, terwijl de druk in de buurt van de rest van de buis, die elders in de klok is opgesteld, altijd heel laag blijft.

J. Nussli, Lic. ès Sci., destijds medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk, thans medewerker van Hyperélec, Brive-la-Gaillarde (Corrèze), Frankrijk.

[1] G. Piétri en J. Nussli, Ontwerp en eigenschappen van moderne fotomultiplicatorbuizen, Philips techn. T. **29**, 276-296, 1968 (no. 8/9).

[2] R. Legoux, De transfertechniek, een nieuwe methode voor de formering van fotokatodes, blz. 238 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

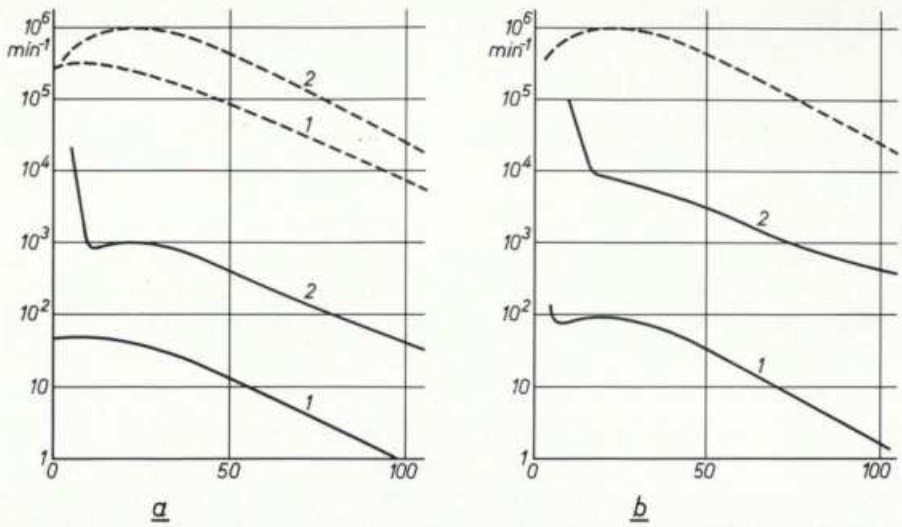


Fig. 1. Amplitudeverdeling van signaalimpulsen en ruisimpulsen bij verschillende fotomultiplicators.
a) Ruissignaal (getrokken krommen) en signaal dat verkregen wordt bij continue belichting (gestippelde krommen) van een met de transfertechniek vervaardigde buis PM 403 F (krommen *1*) en een op normale manier vervaardigde buis 56 AVP 03 (krommen *2*).
b) Ruissignaal van de fotomultiplicator XP 1020, gefabriceerd met behulp van de transfertechniek (getrokken kromme *1*) en volgens de normale methode (getrokken kromme *2*). Het signaal dat verkregen wordt bij continue belichting heeft bij beide buizen dezelfde amplitudeverdeling (gestippelde kromme).

In de fabrieken te Brive wordt de transfertechniek nu toegepast voor de fabricage van korte series van buizen met versterkte constructie, die afgeleid zijn van de PM 400 [1]. Deze buizen, waarvan de PM 403 F een typisch voorbeeld is [3], zijn geschikt voor gebruik in ruimtevaartuigen en satellieten. Hun donkerstroom ligt tussen 20 en 50 elektronen per seconde. Het zuiver thermische karakter van deze stroom wordt gedemonstreerd door het feit dat de amplitudeverdeling [1] van de donkerstroomimpulsen identiek is met die van de impulsen die door foto-elektronen worden veroorzaakt (de twee krommen *1* in fig. 1*a*).

De toepassing van de transfertechniek biedt wel enkele problemen. Het alkalilaagje dat op alle oppervlakken wordt neergeslagen speelt niet alleen een schadelijke rol, het heeft ook een gunstige uitwerking doordat het de secundaire emissie van de dynodes bevordert. Door zijn afwezigheid wordt dus deze emissie iets geringer en men is gedwongen iets hogere spanningen toe te passen om weer dezelfde versterking te bereiken. In het algemeen is dit geen bezwaar en soms zelfs gunstig, nl. als het op de responsiesnelheid aankomt.

Voorts werkt het alkalilaagje in de buis als getter, hetgeen zeer welkom is als men zich realiseert welke schadelijke invloed gassen als O_2, H_2 en CO_2 op de fotokatodes kunnen hebben (de adsorptie van enige atoomlagen van deze gassen heeft een vrijwel volledige vernietiging van de gevoeligheid ten gevolge). Men moet dus bijzondere zorg besteden aan de ontgassing van de onderdelen van de buis, vooral van die delen die door de elektronen worden getroffen. Toch wordt dit gerechtvaardigd door de verbetering die men ten aanzien van de donkerstroom bereikt (*fig. 1*).

Een fotomultiplicator die in dit opzicht ernstige moeilijkheden in de fabricage veroorzaakte was de XP 1020. Om de fluctuaties in looptijd te beperken, bleek het noodzakelijk tussen bepaalde elektrodes vrij sterke elektrische velden toe te passen. De donkerstroom van deze buis bedraagt gemiddeld 10^4 elektronen per seconde. Enige met de transfertechniek vervaardigde experimentele buizen daarentegen hebben een donkerstroom die gemiddeld 100× kleiner is.

Het voorbeeld van de XP 1020 illustreert duidelijk de voordelen van de transfertechniek voor de vervaardiging van snelle buizen. Immers, de responsiesnelheid neemt met de spanning toe en deze wordt in de praktijk beperkt tot een waarde waarbij nog geen veldemissie optreedt. De transfertechniek maakt het dus in principe mogelijk deze barrière te doorbreken en buizen met aanzienlijk hogere spanningen te gebruiken. We hopen van deze mogelijkheid al binnenkort gebruik te maken.

Ten slotte nog een ander perspectief: voor het opdampen kan men in de ruimte waarin de activering plaatsvindt *maskers* plaatsen, om een scherpe aftekening van het geactiveerde fotokatode-oppervlak te krijgen. Met behulp van zulke maskers kan men op het venster hetzij een katode van zeer klein oppervlak aanbrengen, waardoor de thermische emissie klein blijft, hetzij een aantal elektrisch gescheiden katodes (PM 450 FH, PM 450 FQ [3]). De emissie van ieder katodegedeelte kan dan door middel van schakelimpulsen naar believen worden in- en uitgeschakeld. Een dergelijke fotomultiplicator kan als plaatsdetector van aankomende deeltjes fungeren.

We gaan nu over tot twee geheel nieuwe soorten fotomultiplicators, waarbij de mogelijkheden van de transfertechniek een nog grotere rol spelen.

De hybridische fotomultiplicator

In een hybridische fotomultiplicator (*fig. 2*) vindt de versterking van het foto-elektrische signaal niet meer plaats door secundaire emissie; de foto-elektronen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

worden tot een energie E (10 tot 40 keV) versneld en dan in een P-N-overgang van een halfgeleider geabsorbeerd, waar ieder foto-elektron een aantal ladingdragerparen (elektronen en gaten) vrijmaakt gelijk aan

$$\frac{E - E_V}{E_0}.$$

Hierbij is E_V de energie die het foto-elektron in het venster van de detector verliest en E_0 de gemiddelde ionisatie-energie van het halfgeleidermateriaal (voor silicium is gewoonlijk $E_0 = 3{,}6$ eV). Aan de P-N-overgang is een voorspanning in de keerrichting gelegd, en de dikte van het ruimteladingsgebied waarin de ladingdragers worden vrijgemaakt beantwoordt aan de indringdiepte van de foto-elektronen, die enkele tientallen microns bedraagt. Het oppervlak van de P-N-overgang bedraagt tussen 10 en 100 mm^2; het moet geschikt gekozen worden met het oog op de geometrische spreiding van de elektronenbundel (dus de focussering), de toelaatbare capaciteit en andere parameters. Het venster, dat één van de elektrodes van de P-N-overgang vormt, moet dun genoeg zijn om het energieverlies E_V klein te houden.

Deze P-N-overgangen lijken zeer op die welke algemeen worden gebruikt voor de detectie van geladen deeltjes. Zonder dieper op de theorie en praktijk van deze detectors in te gaan, willen we hier vermelden dat hun donkerstroom en doorslagspanning in hoofdzaak samenhangen met lekken in het oppervlak van de overgang; deze eigenschappen zijn derhalve buitengewoon gevoelig voor iedere desorptie of adsorptie van atomen van verontreinigingen. Gedurende de eerste pogingen dergelijke elementen in een fotobuis in te bouwen, heeft men hierdoor met twee moeilijkheden te kampen gehad: de eigenschappen van de P-N-overgang moeten niet alleen in vacuüm onveranderd blijven, maar ook na ontgassen gedurende verscheidene uren op 350 °C; anderzijds mag de lekstroom niet in ongewenste mate toenemen door het neerslaan van alkalimetalen op het oppervlak van de detector.

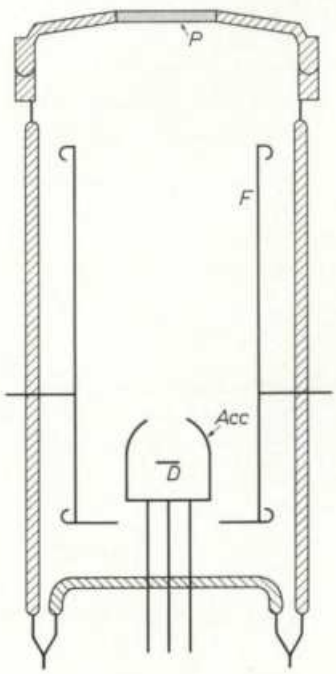


Fig. 2. Schematische voorstelling van de hybridische fotomultiplicator. *P* fotokatode. *F* focusseerelektrode. *Acc* versnellingselektrode. *D* halfgeleiderdetector.

Halfgeleiderdetectors van dit type worden ontwikkeld en gefabriceerd bij R.T.C. La Radiotechnique-Compelec. In de laboratoria van R.T.C. te Caen zijn verschillende oplossingen uitgewerkt om de eerstgenoemde moeilijkheid bij de vervaardiging van een hybridische fotomultiplicator te overwinnen. De tweede moeilijkheid daarentegen wordt geëlimineerd door toepassing van de transfertechniek. Men vangt daarbij twee vliegen in een klap, want het probleem van de veldemissie, dat reeds bij de spanningen in conventionele fotomultiplicators (beneden 3 kV) moeilijkheden veroorzaakt, dreigde bij spanningen tussen 10 en 40 kV onoverkomelijk te worden.

De eerste hybridische fotomultiplicator werd gemaakt door R. Kalibjian [4]; het streven was daarbij een lineair gebied voor impulsen tot 5 A en hoger te verkrijgen. In deze richting wordt nu ook bij Hyperélec te Brive en bij R.T.C. te Caen gewerkt, waar men een detector heeft ontwikkeld die gebaseerd is op het principe van de „omgekeerde epitaxie" [5].

We willen nu echter wat nader ingaan op een ander soort hybridische fotomultiplicator, die in het LEP is ontwikkeld en die bestemd is voor een ander doel, nl. voor het bereiken van een geringere statistische fluctuatie van de versterking.

Deze fluctuaties, die evenredig zijn met $1/\sqrt{\delta}$, zijn bij een normale fotomultiplicator [1] aanzienlijk doordat de versterking δ klein is (ongeveer 3) en ook doordat het opvangrendement voor de secundaire elektronen voor de verschillende dynodes verschilt. Bij het detecteren van scintillaties (γ-spectroscopie) worden alleen hierdoor de fluctuaties al 20-30 % groter dan ze in het ideale geval zouden zijn als alleen het aantal foto-elektronen n zou fluctueren. Is n zeer klein, dan wordt elke informatie over de waarde van n dermate vervaagd dat het niet meer mogelijk is impulsen die door één dan wel door twee foto-elektronen worden opgewekt door hun amplitude te onderscheiden. De verbetering door de hybridische fotomultiplicator kunnen we als volgt illu-

[3] Ontwikkeld in opdracht van het Centre National d'Etudes Spatiales.

[4] R. Kalibjian, A phototube using a semiconductor diode as the multiplier element, IEEE Trans. **NS-13**, no. 3, 54-62, 1966.

[5] J. Fertin, B. Lach, J. Meuleman, J. Dupuis, L'Hermite en R. Petit, Reverse epitaxial silicon diode for hybrid photomultiplier tube, IEEE Trans. **NS-15**, no. 3, 179-189, 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

streren. De absolute waarde Δq van de fluctuatie van de aan de anode opgevangen lading wordt voor de normale fotomultiplicator bij benadering gegeven door $\Delta q \approx G \times q \times 1{,}5\sqrt{n}$, waarin G de versterking van de fotomultiplicator is en q de lading van het elektron. Daarentegen is in een hybridische fotomultiplicator die gevoed wordt met een spanning van 35 kV de fluctuatie van de 10 000 vrijgemaakte paren ladingdragers zeer veel kleiner, al bereikt zij niet de hieraan beantwoordende theoretische waarde van $1/\sqrt{10\,000} = 0{,}01$. De fluctuatie, die men gewoonlijk opgeeft als een scheidend vermogen, uitgedrukt in keV, is bij deze fotomultiplicator te wijten aan verschillende processen die een rol spelen in de halfgeleider (fluctuatie van donkerstroom en ruis van de versterking), en men bereikt tegenwoordig waarden van 10 keV. In het geval van de hybridische fotomultiplicator, gevoed met 35 kV ($G = 10^4$), beantwoordt dit aan een absolute ladingfluctuatie in de buurt van $G \times q \times 0{,}3$. De terugdiffusie (onelastische terugkaatsing van een klein deel van de foto-elektronen) veroorzaakt een des te grotere fout naarmate het aantal elektronen n groter is. In *fig. 3* vindt men verschillende spectra die verkregen zijn met de hybridische fotomultiplicator. Het toegepaste halfgeleiderelement is een *P-N*-overgang (gemaakt volgens de planaire techniek) voorzien van een afschermring; de randen zijn met SiO_2 gepassiveerd om de lekstromen te beperken. Het oppervlak is 12 mm².

Weliswaar zijn voor een dergelijke fotomultiplicator voedingsapparaten voor zeer hoge spanning en versterkers met zeer geringe ruis en grote versterkingsfactor vereist, maar dergelijke hulpmiddelen zijn tegenwoordig beschikbaar. Aan de stabilisatie worden minder hoge eisen gesteld, daar de versterkingsfactor nu niet meer met de tiende of twaalfde macht doch slechts lineair met de spanning varieert. Ten slotte mag men van een dergelijke fotomultiplicator ook een aanzienlijk betere stabiliteit verwachten bij variatie van parameters als de impulsdichtheid of de temperatuur.

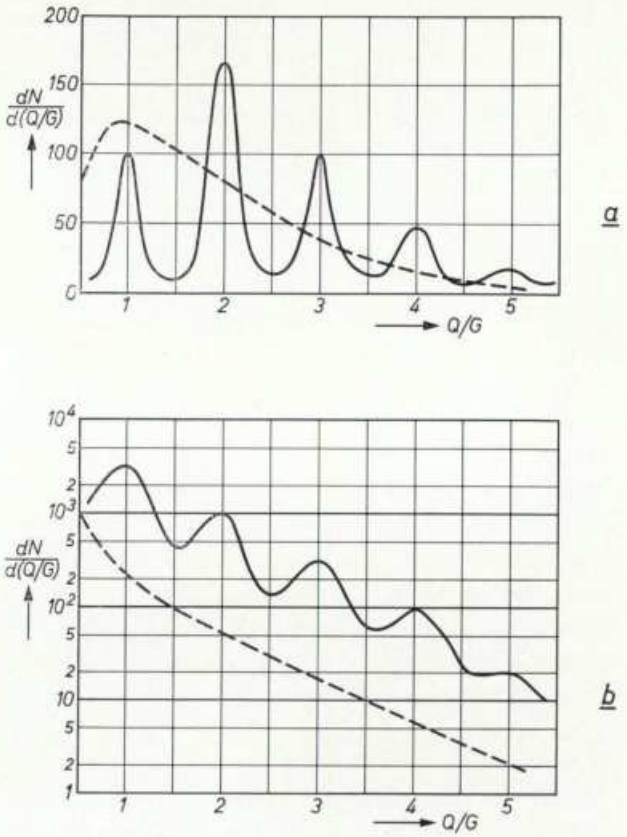


Fig. 3. Amplitudeverdeling van de impulsen die van een in het LEP ontwikkelde hybridische fotomultiplicator worden verkregen, *a*) bij de lichtflits van een kortdurende vonkontlading, *b*) bij de scintillaties die door de β-stralen van tritium in een vloeibare scintillator worden opgewekt.

Uitgezet is de dichtheid van het aantal getelde impulsen als functie van het aantal aan de fotokatode vrijgemaakte elektronen (totale lading Q — gemeten in elektronenladingen q — gedeeld door de versterking G). Gestippeld zijn de spectra weergegeven die met een normale fotomultiplicator zouden worden verkregen.

Pijpen-fotomultiplicators

De algemene eigenschappen van multiplicatorpijpen en pijpenplaatjes zijn eerder in dit tijdschrift beschreven [6]. In een plaatje met een oppervlakte van enige mm² en een dikte tussen 1 en 10 mm kunnen 1 miljoen multiplicatorpijpjes gebundeld zijn. Een elektronenstroom die op het ene vlak van het plaatje valt veroorzaakt aan het andere vlak een emissie van een stroom die 10^4 tot 10^5 maal groter is, waarbij tussen de vlakken een spanning van minder dan 1,5 kV aangelegd moet worden. Hoe de pijpenplaatjes vervaardigd worden, is elders in dit nummer beschreven [7].

Het leek ons aantrekkelijk de mogelijkheden te onderzoeken die het gebruik van dergelijke pijpenplaatjes in fotomultiplicators opent. Een voor de hand liggend *nadeel* is, dat een aanzienlijk percentage van de foto-elektronen aan het intreevlak door de doorsnede van de wanden van de pijpjes wordt opgevangen, zodat het detectierendement wordt verminderd; daardoor zijn dergelijke fotomultiplicators niet goed te gebruiken voor kernspectroscopie. Bepaalde voordelen echter kan men verwachten door het feit dat de afmeting in de looprichting van de elektronen klein is (waardoor de looptijd zeer kort en dientengevolge de fluctuaties in looptijd zeer klein worden), terwijl het oppervlak loodrecht op de voortplantingsrichting zeer uitgebreid is, zodat brede bundels versterkt kunnen worden. Bovendien kunnen wij nu dank zij de transfertechniek buizen maken waarbij de fotokatode en de multiplicator zeer dicht bij elkaar geplaatst worden en waarbij tussen deze vlakke elektrodes sterke elektrische velden kunnen worden toegepast zonder dat teveel veldemissie optreedt. Men komt derhalve vanzelf tot een configuratie als in *fig. 4* is afgebeeld. Dit is een doorsnede van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

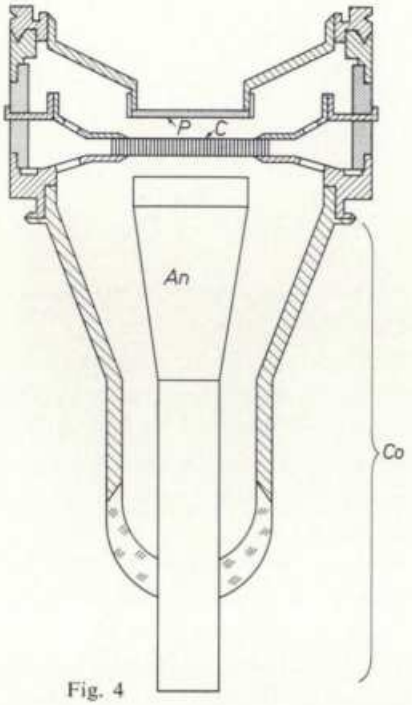


Fig. 4

Fig. 5

Fig. 4. Doorsnede van een fotomultiplicator met pijpenplaat. *P* fotokatode. *C* pijpenplaat. *An* anode. *Co* coaxiale uitgang.

Fig. 5. Aanzicht van de in fig. 4 getekende pijpen-fotomultiplicator. Totale lengte 80 mm, diameter 40 mm.

in *fig. 5* weergegeven pijpen-fotomultiplicator, die een berekende looptijd heeft van 1 ns, een stijgtijd van 0,2 ns en een lineair gebied dat zich uitstrekt tot boven 1 A. Zijn versterkingsfactor is niet zeer hoog, ongeveer 10^4, en dit beperkt zijn bruikbaarheid tot relatief sterke lichtflitsen, zoals die welke men bij snelle verschijnselen in plasma's waarneemt. De versterkingsfactor kan niet groter worden gemaakt doordat er positieve ionen worden vrijgemaakt, die naar de katode lopen, hier elektronen vrijmaken en daardoor na-impulsen of zelfs een zelfstandige ontlading teweegbrengen. De pijpen-fotomultiplicator neemt derhalve een middenpositie in tussen de biplanaire foto-emissiediodes, die zeer snel zijn, en de normale fotomultiplicators met grote versterkingsfactor maar geringere snelheid.

Men moet nog rekening houden met een eigenschap van dit soort fotomultiplicators die de toepassing in bepaalde gevallen onmogelijk zal maken: hun elektrische weerstand mag nooit veel kleiner zijn dan $10^8\ \Omega$, daar het anders te moeilijk wordt de ontwikkelde warmte af te voeren. De gelijkstroomcomponent van het signaal kan derhalve niet groter zijn dan 10^{-5} A, zodat de impulsdichtheid beperkt wordt tot 10^7 elektronen per seconde bij een versterking van 10^7 (en in de praktijk zijn deze waarden nog 10 of 100× kleiner). De maximale bij een korte impuls (b.v. van 1 μs) getransporteerde lading is beperkt tot ongeveer 10^{-9} C/cm². De duur van een impuls van 1 A mag derhalve hoogstens 1 ns bedragen.

Conclusie

Het is vooralsnog moeilijk te voorspellen op hoe grote schaal de transfertechniek in de toekomst bij de fabricage van fotomultiplicators zal worden toegepast. Het is mogelijk dat door de vrij hoge kosten de toepassing ervan beperkt zal blijven tot buizen voor zeer hoge prestaties. Maar de techniek is nog vatbaar voor verdere ontwikkeling. De bemoedigende resultaten die in de fabrieken te Brive verkregen zijn met fotomultiplicators met versterkte constructie, voorzien van bi- of trialkali-katodes, laten in ieder geval verwachten dat wij dank zij deze techniek in staat zullen zijn de fysici fotomultiplicators met nog betere prestaties dan de tegenwoordige ter beschikking te stellen.

Samenvatting. Bij toepassing van de transfertechniek voor het activeren van de fotokatodes van conventionele fotomultiplicators wordt een aanzienlijke verbetering van de ruiseigenschappen en in sommige gevallen ook van de gevoeligheid verkregen. Voorts zal deze nieuwe techniek de ontwikkeling van nieuwe soorten buizen mogelijk maken, zoals een hybridische fotomultiplicator, waarbij de multiplicator bestaat uit een halfgeleider-elektronendetector (met versnelling van de elektronen tot een energie tussen 10 en 40 keV), of een pijpen-fotomultiplicator, die voorzien is van een plaat van elektronenmultiplicatorpijpjes. Bij de hybridische fotomultiplicator heeft men geringere statistische fluctuaties van de amplitudes en bij de pijpen-fotomultiplicator krijgt men een snellere responsie.

[6] J. Adams en B. W. Manley, De elektronenmultiplicatorpijp, een nieuwe stralingsdetector, Philips techn. T. **28**, 256-261, 1967.

[7] G. Eschard en R. Polaert, Het vervaardigen van elektronenmultiplicatorpijpen en pijpenplaatjes, blz. 257 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ultrasnelle fotografie

H. Bacchi en G. Eschard

Dit artikel beschrijft verschillende onderzoekingen over ultrasnelle fotografie, die ten dele zijn gedaan in opdracht van het Franse Commissariat à l'Energie Atomique en uitgevoerd in nauwe samenwerking met E. Laviron en C. Delmare van het Centre d'Etudes te Limeil en met J. Marilleau van het Centre d'Etudes te Vaujours.

Snelle camera's voor het opnemen van volledige beelden kunnen in drie groepen worden ingedeeld: mechanische, elektro-optische en elektronische.

Met mechanische camera's heeft men sinds 1954 snelheden bereikt van 10^7 opnamen per seconde, waarbij de mogelijkheid bestaat om van een zelfde verschijnsel een groot aantal opnamen te maken (20 tot 100, naar gelang van de uitvoering). De kortste bereikbare belichtingstijd bij deze camera's bedraagt ongeveer 50 ns.

Elektro-optische camera's bevatten een ingangsobjectief, een sluiter bestaande uit een elektro-optische cel — meestal een tussen twee gekruiste polarisatoren geplaatste Kerr-cel — en een heraf beeldingsobjectief. Bij deze camera's wordt de belichting teweeggebracht door een spanning van 15-20 kV op de cel te zetten. De belichtingstijd kan tot een waarde van 1 ns worden gereduceerd. Het belangrijkste nadeel is dat de sluiter in open toestand slechts 10-20% van het invallende licht doorlaat.

Elektronische camera's, die voor het eerst in 1962 op de markt verschenen, leveren betere prestaties dan de zojuist genoemde camera's. Ze zijn ook voor een groter toepassingsgebied geschikt. In dit artikel zullen wij ons alleen met dit soort camera's bezighouden. Het hart van de camera is in dit geval een *beeldtransformator*, die als sluiter fungeert en die weer in combinatie met een ingangsobjectief en een heraf beeldingsobjectief wordt toegepast.

De beeldtransformators die in dergelijke camera's worden gebruikt bestaan in principe alle uit een fotokatode en een fluorescentiescherm. Door het ingangsobjectief wordt de op te nemen scène op de fotokatode afgebeeld; het fluorescentiescherm ontvangt de geëmitteerde foto-elektronen en reproduceert het op de fotokatode geworpen beeld gedurende een relatief lange tijd (0,1-10 ms), vergeleken bij de tijd gedurende welke de buis „open" is (b.v. 1 ns).

H. Bacchi, ingénieur A.M. en E.S.E., en G. Eschard, ingénieur E.S.E., Dr. Ing., medewerkers van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Men heeft drie soorten beeldtransformatorbuizen:

1) Diode-transformators, waarbij een fotokatode en een fluorescentiescherm in twee evenwijdige vlakken op geringe afstand van elkaar zijn geplaatst; een uitvoering hiervan zal hieronder nader worden beschreven.
2) Triode-transformators, waarbij de werking van de buis bestuurd wordt door een elektrode in de vorm van een rooster of ring [1].
3) Transformators met afbuigplaten, waarbij de sluiterwerking wordt verkregen door de elektronenbundel over een diafragma met zeer kleine afmetingen te verplaatsen [2].

Er bestaan nog andere soorten beeldtransformators, die b.v. tevens als geheugen kunnen fungeren [3] of die met ladingsaccumulatie werken, maar deze zijn nog niet in algemeen gebruik.

Behalve de functie als sluiter levert een beeldtransformatorbuis ook een fotonenversterking, en desgewenst kan hij gekoppeld worden met een helderheidsversterker. Hierdoor kan men met de elektronische camera met uiterst korte belichtingstijd verschijnselen fotograferen die voor een elektro-optische camera te lichtzwak zijn.

Zoals de naam zegt, kan de beeldtransformator bovendien een omzetting in andere lichtfrequenties teweegbrengen, en naar gelang van de gebruikte fotokatode kan hij gevoelig zijn voor straling van uiteenlopende golflengten. Gebruikt men b.v. een fotokatode van type S 1, die tot 1,1 μm gevoelig is, dan krijgt men een frequentie-omzetting aangezien het fluorescentiescherm, waarop het beeld ontstaat, straling levert met golflengten in het zichtbare spectrum, in de buurt van 0,55 μm. Dank zij deze omzetting kan men films van zeer hoge gevoeligheid gebruiken, die voor de langere golven vrijwel niet bestaan.

Aan de belichtingstijd die men met deze buizen kan bereiken wordt een onderste grens gesteld, hetzij door de looptijd van de foto-elektronen tussen de fotokatode en het scherm, hetzij door voortplantingsverschijnselen langs het oppervlak van de fotokatode. Deze verschijnselen, die inherent aan de buis zijn, stellen in de praktijk een onderste grens van de orde van 100 picoseconden aan de belichtingstijd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een als sluiter werkende beeldtransformator wordt geopend door op de elektrodes een impuls van hoge spanning te zetten, gewoonlijk tussen 15 en 20 kV. De duur van de impuls bepaalt bij benadering de belichtingstijd. Wil men belichtingstijden in de buurt van de grenswaarde die de buis toelaat bereiken, dan moet de stuurschakeling impulsen kunnen leveren met een stijg- en daaltijd van de orde van 100 picoseconden.

De essentiële eigenschappen van de buizen en de stuurschakelingen zijn direct uit deze eis af te leiden. Een spanningsverandering die zich in zo korte tijd afspeelt kan alleen aan een buis gelegd worden indien de spanning toegevoerd wordt via een transmissielijn die geschikt is tot frequenties van de orde van 3 GHz. De buis moet natuurlijk deel uitmaken van deze transmissielijn, en hierdoor wordt de geometrie van het elektrodenstelsel waarop de gevoelige lagen gevormd moeten worden vastgelegd.

Wegens de betrekkelijk korte afstand tussen de fotokatode en het scherm (vgl. formule (1) op blz. 248) en gezien de eis dat de nuttige oppervlakte enkele cm^2 moet bedragen, moeten we een transmissielijn met een karakteristieke impedantie van ongeveer 25 Ω gebruiken. Dit betekent dat bij aanleggen van een impuls van 15 kV de stroom een waarde van ongeveer 600 A zal bereiken. Om zulke stromen te kunnen schakelen, moeten we de ontsteekschakeling voorzien van een ultrasnelle vonkbrug. Een brug met een coaxiale constructie bleek voor ons werk het best te voldoen [4] [5].

We zullen hieronder zien dat de stijgtijd van het golffront dat een generator met een vonkbrug levert evenredig is met de afstand tussen de vonkelektrodes [6]. Aan deze afstand wordt door twee factoren een onderste grens gesteld: a) de nuttige levensduur, die bij verkleining van de afstand korter wordt, b) de gasdruk van de ruimte waarin de vonkovergang plaatsvindt. Immers, de spanning waarbij de vonk moet overslaan wordt bepaald door de vereiste spanning voor de sluiter, en willen wij bij gegeven spanning de afstand tussen de elektrodes verminderen, dan moeten wij de druk verhogen (wet van Paschen). De druk kan men om technische redenen niet hoger opvoeren dan tot 20 of 30 bar; hiermee komen we tot een elektrodenafstand van enige tienden mm.

De factoren die in laatste instantie de minimumduur van de stijgtijd bepalen zijn derhalve de elektrodenafstand van de vonkbrug en de kwaliteit van de verschillende aanpaselementen in de transmissielijn, die de vonkbrug met de sluiter verbindt.

Is tijdens de belichting een volmaakt constante transmissiefactor gewenst, en wel gedurende een nauwkeurig bepaalde tijd, dan moeten nog meer eisen aan de stuurschakeling worden gesteld. Om te waarborgen dat de camera vóór en na de gewenste belichtingstijd zo weinig licht ontvangt als de maximale opaciteit van de beeldtransformator toelaat, moet men ervoor zorgen dat de aangelegde impuls ondanks de extreem korte duur behoorlijk rechthoekig van vorm blijft.

Bij de constructie van ultrasnelle vonkbruggen, ingebouwd in coaxiale lijnen, is in het LEP zoveel vooruitgang geboekt dat thans de vereiste schakelingen kunnen worden gerealiseerd. Over deze vonkbruggen is verder onderzoek gaande en wij verwachten dat hun prestaties nog zullen worden opgevoerd.

We geven nu een korte beschrijving van de transformatorbuizen die in het LEP zijn ontwikkeld, en van verschillende soorten camera's waarin deze buizen worden gebruikt. De buizen zijn al eerder beschreven door Eschard en Polaert [7], en een beschrijving van verschillende opstellingen is gegeven in de aangehaalde artikelen [4] [5] alsmede in een voordracht voor het 8ste Internationale Congres over ultrasnelle fotografie [8]. Deze artikelen bevatten ook een nadere beschrijving van verschillende voorbeelden van vonkbruggen met twee of drie elektrodes die in het Laboratoire Central de l'Armement en in het LEP zijn ontwikkeld.

Beeldtransformatorbuizen

De laatste jaren hebben wij een hele familie van sluiters in de vorm van vlakke diodes ontwikkeld [9]. In principe lijken al deze sluiters zeer op elkaar; voor hun vervaardiging wordt de methode van activering van de fotokatode met de transfertechniek toegepast [10]. Op blz. 240 in dit nummer is een laboratoriumopstelling afgebeeld waarmee buizen met een nuttige diameter van de fotokatode tot 120 mm kunnen worden gemaakt. Het is juist een van de voordelen van dit soort sluiters dat hierbij de scherpte van het beeld kan worden verbeterd door tot een grotere diameter over te gaan.

[1] Zie b.v. J. A. Jenkins en R. A. Chippendale, Ultrasnelle momentfotografie met behulp van de beeldtransformator, Philips techn. T. **14**, 363-376, 1952.
[2] A. E. Huston, Proc. 3rd Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1965, blz. 963-966.
[3] R. W. Smith, in: High-speed photography, Proc. 8th Int. Congress, Stockholm 1968, blz. 18-20.
[4] E. Laviron, C. Delmare en H. Bacchi, Caméras électroniques de 1 ns de durée d'ouverture, Onde électr. **48**, 421-425, 1968 (no. 494).
[5] H. Bacchi en M. Blanchet, Générateurs d'impulsions haute tension de 1 nanoseconde à mi-hauteur, Onde électr. **48**, 430-437, 1968 (no. 494).
[6] G. A. Mesjac en V. V. Kremnev, Raideur maximale du front de montée dans un circuit RLC avec éclateur à étincelles, Bull. Acad. Sci. URSS, série Sci. techn., En. et Transp., 1963, no. 1, blz. 53-57.
[7] G. Eschard en R. Polaert, Tube obturateur pour photographie ultra-rapide, Onde électr. **48**, 426-429, 1968 (no. 494).
[8] H. Bacchi en J. Marilleau, in: High-speed photography, Proc. 8th Int. Congress, Stockholm 1968, blz. 57-60; E. Laviron en H. Bacchi, ibidem blz. 61-63.
[9] G. Eschard en R. Polaert, in: High-speed photography, Proc. 8th Int. Congress, Stockholm 1968, blz. 54-56.
[10] P. Dolizy en R. Legoux, Proc. 4th Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1968; zie ook R. Legoux, blz. 238 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De belangrijkste eigenschappen van deze sluiters zijn onlangs in een artikel besproken [11]. We zullen hier eerst de hoofdpunten kort samenvatten, om daarna te laten zien in welke opzichten een verdere ontwikkeling heeft plaatsgevonden; het gaat hierbij om de mogelijkheid katodes te gebruiken die tot in het nabije infrarood gevoelig zijn, en om constructies waarmee extreem korte belichtingstijden kunnen worden bereikt.

Beeldkwaliteit

Plaatsen we het fluorescentiescherm op een afstand d van de fotokatode, dan zal door de beginsnelheden van de elektronen een defocussering optreden. Het resulterende scheidend vermogen R (in lijnenparen per mm) wordt gegeven door de volgende formule:

$$R = \frac{0{,}6}{d}\sqrt{\frac{V}{\frac{hc}{e}\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right)}} \quad . \; . \; . \quad (1)$$

Hierbij is h de constante van Planck, c de lichtsnelheid, e de elektronenlading, λ de golflengte van het opvallende licht, λ_0 de drempelgolflengte van de emissie van de fotokatode en V de aan de buisklemmen gelegde spanning (alles in SI-eenheden).

Door de afstand d klein genoeg te maken, kan men een scheidend vermogen van de orde van 15 lijnenparen per millimeter krijgen. Bedraagt de nuttige diameter van het beeld 60 mm, dan kunnen dus in het hele beeld 1000 lijnenparen op een diameter worden onderscheiden. Van belang is hierbij dat geen beeldvervorming optreedt, speciaal als men fysische eigenschappen, deeltjessnelheden of deformaties van materialen wil meten, of als men spectra wil onderzoeken.

Sluiterverhouding

Bij de hier behandelde sluiters wordt het opvallende licht in hoofdzaak tegengehouden door het fluorescentiescherm, dat aan de achterzijde met een metaallaagje is bedekt. De sluiterverhouding, d.i. de verhouding tussen het doorgelaten licht in open en in gesloten toestand, hangt van de dikte van het metaallaagje af: de opaciteit wordt nl. beperkt door het aantal en de grootte van microscheurtjes in de laag. Bekijkt men het beeld dat de camera van een gelijkmatig verlicht vlak levert als de sluiter geen spanning krijgt, dan zal men een reeks puntjes zien, die aan de genoemde fouten in de metaallaag te wijten zijn. Wij hebben een methode ontwikkeld waardoor met een scherm van type P 11 een sluiterverhouding van meer dan 10^5 kan worden bereikt.

Sluitersnelheid

De belangrijkste factoren die de sluitersnelheid beperken zijn de looptijd van de foto-elektronen, het geleidingsvermogen van de elektrodes, ruimteladingsverschijnselen en de wijze waarop de buis in de transmissielijn is ingebouwd.

Rekening houdende met de vorm van de spanningsimpuls, kan men aantonen dat een *looptijd* van minder dan 80 picoseconden een belichtingstijd met de sluiter mogelijk maakt van 100 picoseconden. Bij de tegenwoordige buizen is dit dus niet de begrenzende factor, maar we zullen zien dat hij bij toekomstige ontwikkelingen een rol kan spelen. Hetzelfde geldt voor *ruimteladingsverschijnselen*.

De betekenis van het *geleidingsvermogen van de elektrodes* kan als volgt worden toegelicht. Zowel de fotokatode als het fluorescentiescherm moeten voldoende geleidend zijn opdat de spanningsimpuls zich zonder te veel vervorming naar het midden van de buis kan voortplanten. De gewoonlijk in dit soort buizen toegepaste fluorescentieschermen voldoen aan deze eis. De normale fotokatodes daarentegen zijn zeer slechte geleiders: we hebben hieraan oppervlakteweerstanden van 10^8 ohm per vierkant gemeten. Daarom moet een geleidende onderlaag worden aangebracht, maar deze zal een gedeelte van het opvallende licht absorberen. Voor een belichtingstijd van 1 ns moet de oppervlakteweerstand van de onderlaag enige tientallen ohms per vierkant bedragen. Hiervoor moet men een verlies van 50% in de versterkingsfactor op de koop toe nemen. Bij de ontwikkeling van sluiters voor nog grotere snelheden zal men onvermijdelijk nog beter geleidende en derhalve nog sterker absorberende onderlagen moeten toepassen. In dat geval zal men de lichtverliezen kunnen beperken door de geleidende laag in een patroon van zeer smalle metallieke banden aan te brengen; men zal dan met de soorten onderlagen die nu in gebruik zijn kunnen werken.

Voor sluitertijden van minder dan 1 ns hebben wij speciaal aandacht moeten besteden aan de vierde factor, het *aanpassen van de buis aan de transmissielijn*. Bij de eerste generatie sluiters hebben we de buis ingebouwd in een lintleiding (strip-line), die met zijn karakteristieke impedantie was afgesloten. Bij de uitvoering die thans wordt ontwikkeld vormt de buis zelf de lintleiding, en de overgang tussen deze lintleiding en de coaxiale voedingskabels vindt binnen de buis plaats. De aanwezigheid van een diëlektricum (glas of keramiek), nodig voor de vacuümdichte afsluiting, veroorzaakt nl. een aanzienlijke discontinuïteit, die moeilijk te compenseren is als het gaat om impulsen met een golffront ter lengte van 0,1 ns. Met coaxiale vacuümdichte doorvoeringen die wij nu ontwikkeld hebben kunnen wij impulsen van 50 picoseconden zonder merkbare vervorming overbrengen. *Fig. 1*, opgenomen met de

[11] G. Eschard en R. Polaert, Proc. 4th Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

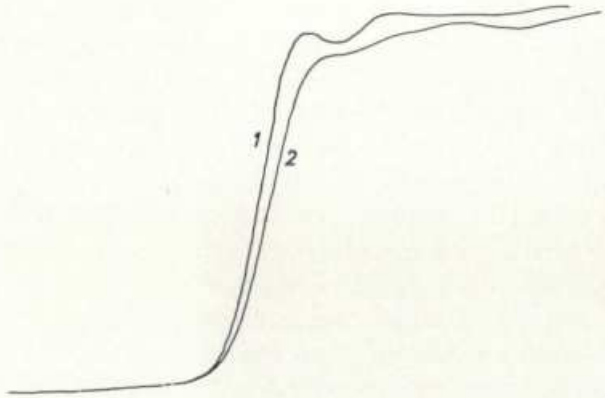


Fig. 1. Met de reflectometer opgenomen impulsresponsie van een ultrasnelle sluiter van type 42-25. Kromme *1* ingangssignaal, stijgtijd 100 ps; kromme *2* uitgangssignaal, stijgtijd 120 ps.

reflectometer, laat zien hoe hiermee een impuls wordt overgebracht.

Om met deze buis een voldoend groot nuttig oppervlak te krijgen, moesten wij met een karakteristieke impedantie van 25 Ω werken. Voor de overbrenging worden derhalve *twee* aangepaste coaxiale kabels met een karakteristieke impedantie van 50 Ω gebruikt, die binnen de buis verbonden zijn.

De fotokatode

Met behulp van de bovengenoemde transfertechniek [10] kunnen verschillende soorten fotokatodes worden gemaakt, in het bijzonder de katodes S 20 en S 24. In de laatste tijd hebben wij de techniek uitgewerkt voor de vervaardiging van buizen met zilvercesium-lagen (S 1), die gevoelig zijn in het nabije infrarood. In *fig. 2* is een beeld van een testpatroon weergegeven dat werd opgenomen met straling in het golflengtegebied tussen 1 en 1,2 μm. Het scheidend vermogen is 18 lijnenparen per mm.

Daar tegenwoordig steeds meer wordt geëxperimenteerd met laser-lichtbundels met golflengten in dit spectrale gebied, zullen sluiterbuizen met deze fotokatode velerlei toepassingen kunnen vinden.

De versterkingsfactor

Met de tot dusver ontwikkelde buizen kan bij een golflengte van 430 nm een fotonenversterking van 30 worden verkregen.

Bij de door ons gebouwde camera wordt echter door de heraf beeldingsoptiek slechts een klein deel van de lichtstroom die het fluorescentiescherm uitzendt nuttig gebruikt. Bij grote buizen is het praktisch onmogelijk een grote openingsverhouding te bereiken zonder een storende vervorming te introduceren. Deze moeilijkheid kan worden opgelost door toepassing van vensters met vezeloptiek. Met de sluiter type 1325, die in *fig. 3* weergegeven is, wordt dan ook een totale versterkingsfactor van de orde van 30 bereikt, gerekend vanaf het licht dat op de fotokatode valt tot datgene dat de fotografische plaat bereikt.

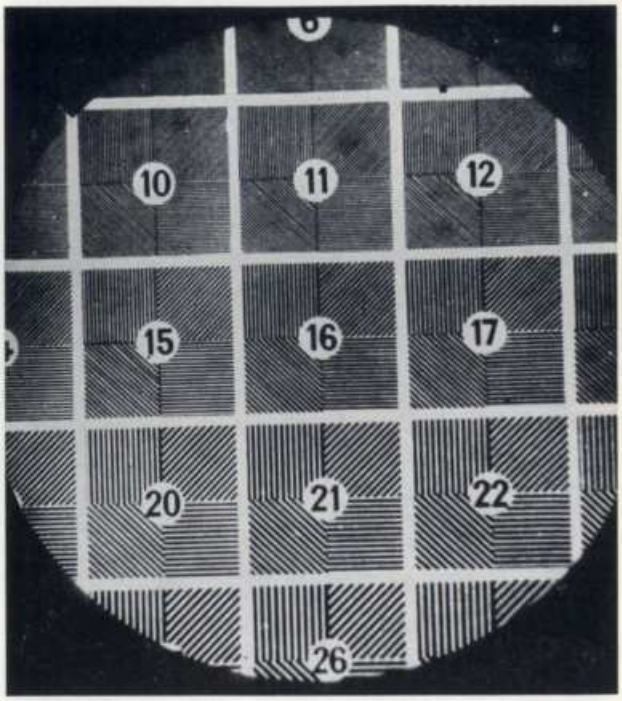


Fig. 2. Beeld van een testpatroon, opgenomen met straling van golflengte tussen 1 en 1,2 μm, door toepassing van een fotokatode S 1.

Fig. 3. De sluiterbuis type 1325.

In de toekomst zullen ook helderheidsversterkers met elektronenmultiplicatorpijpen worden gebruikt. De eerste experimenten in die richting hebben aangetoond dat hiervan veel kan worden verwacht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Camera's

De door ons geconstrueerde camera's zijn te verdelen in twee categorieën, waarbij verschillende beeldtransformatorbuizen worden toegepast. Sommige hiervan zijn enkeltrapsbuizen, dat wil zeggen zij bevatten een enkele fotokatode en een enkel fluorescentiescherm volgens het hierboven beschreven principe. Daarnaast zijn er zg. tweetrapsbuizen, bestaande uit twee enkeltrapsbuizen die door een vezeloptiekplaat tussen het fluorescentiescherm van de eerste buis en de fotokatode van de tweede buis zijn gekoppeld.

De eerste categorie camera's is geschikt voor relatief lange belichtingstijden (5-500 ns). Zulke camera's worden in hoofdzaak toegepast in de ballistiek en voor het onderzoek van explosieven. Tot de tweede categorie behoren de camera's met uiterst korte belichtingstijden, die tegenwoordig in het gebied van omtrent 1 ns liggen en die we naderhand tot enkele honderdsten picoseconden hopen te verminderen. Deze camera's worden in hoofdzaak gebruikt voor de plasmafysica.

Camera voor 5-500 ns met enkeltrapsbuis

Een camera van de eerste categorie (5-500 ns) is in *fig. 4* afgebeeld. Deze is uitgerust met een enkeltrapsbuis met een diameter van 38 of 60 mm. De camera bestaat in hoofdzaak uit het optische gedeelte, waartoe de sluiterbuis en een fototoestel voor polaroidfilm behoren, en de impulsgenerator, die zeer klein gehouden is en die met het optische gedeelte verbonden is door twee flexibele coaxiale kabels. De impulsgenerator levert een impuls van 15 kV van vrijwel rechthoekige vorm met een impulslengte tussen 5 en 500 ns en met een stijgtijd van de orde van 1 ns.

Het tijdstip waarop het te fotograferen snelle verschijnsel optreedt ligt in het algemeen niet goed vast. De belichting moet derhalve door het verschijnsel zelf worden gestart. Essentiële eigenschappen van de camera zijn derhalve dat de startvertraging zeer kort is (35 ns) en de fluctuaties hiervan zeer gering (3 ns).

Fig. 5 geeft het schema van de schakeling die de hoogspanningsimpuls levert. De schakeling bevat een condensator C, een schakelaar I en twee transmissielijnen L_1 en L_2 van ongelijke lengte, die afgesloten zijn met hun karakteristieke impedantie Z_c. De sluiter, met fotokatode K en fluorescentiescherm S, is tussen de beide transmissielijnen vlak bij hun afsluitimpedanties aangebracht. Wordt de schakelaar gesloten, dan plant zich een golffront met amplitude V_0 over elk van de

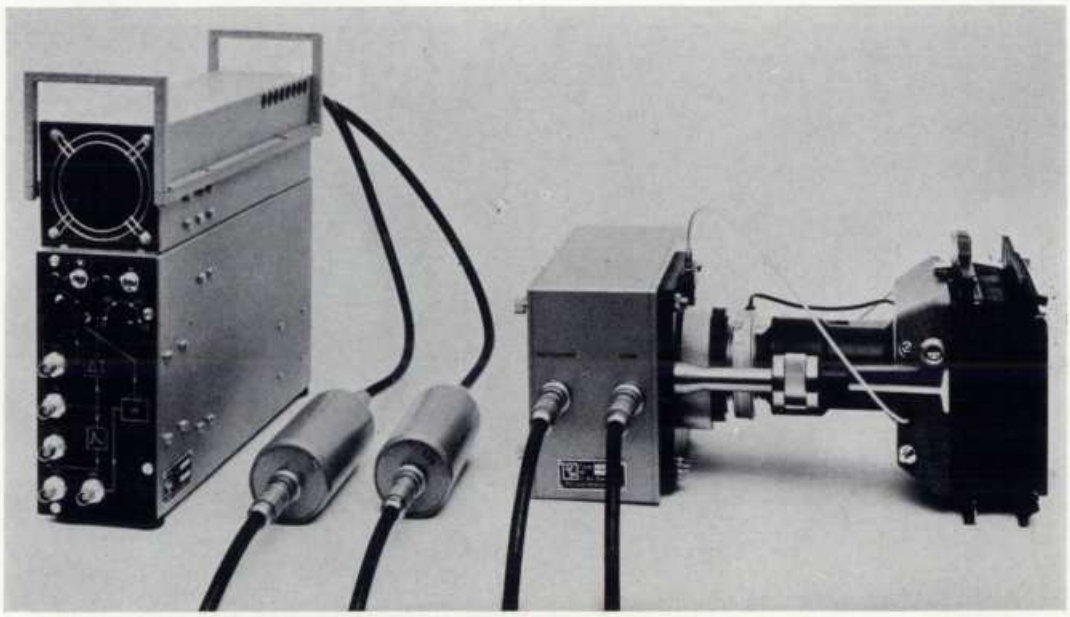


Fig. 4. Camera voor een belichtingstijd van 5-500 ns. Links de impulsgenerator met vonkbrug, rechts het optische gedeelte met de sluiterbuis.

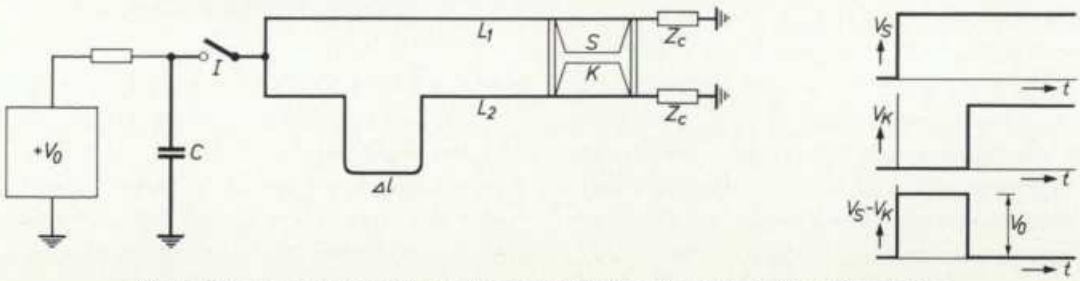


Fig. 5. Schema van de impulsgenerator voor de camera met belichtingstijd 5-500 ns.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

twee lijnen in de richting van hun afsluitimpedanties voort. De sluiter krijgt derhalve tussen zijn beide elektrodes een impuls $V_S - V_K$ met amplitude V_0 en met een duur die bepaald is door het lengteverschil Δl van de beide transmissieleidingen (zie het rechter gedeelte van fig. 5).

Fig. 6 is een meer gedetailleerd schakelschema. De keten wordt gesloten door het ontsteken van een vonkbrug met drie elektrodes. De ontsteekschakeling bestaat in hoofdzaak uit een Marx-generator die opgebouwd is uit avalanche-transistors en een eindversterker met een vacuümtetrode. Deze ontsteekschakeling veroorzaakt een vertraging van de orde van 15 ns.

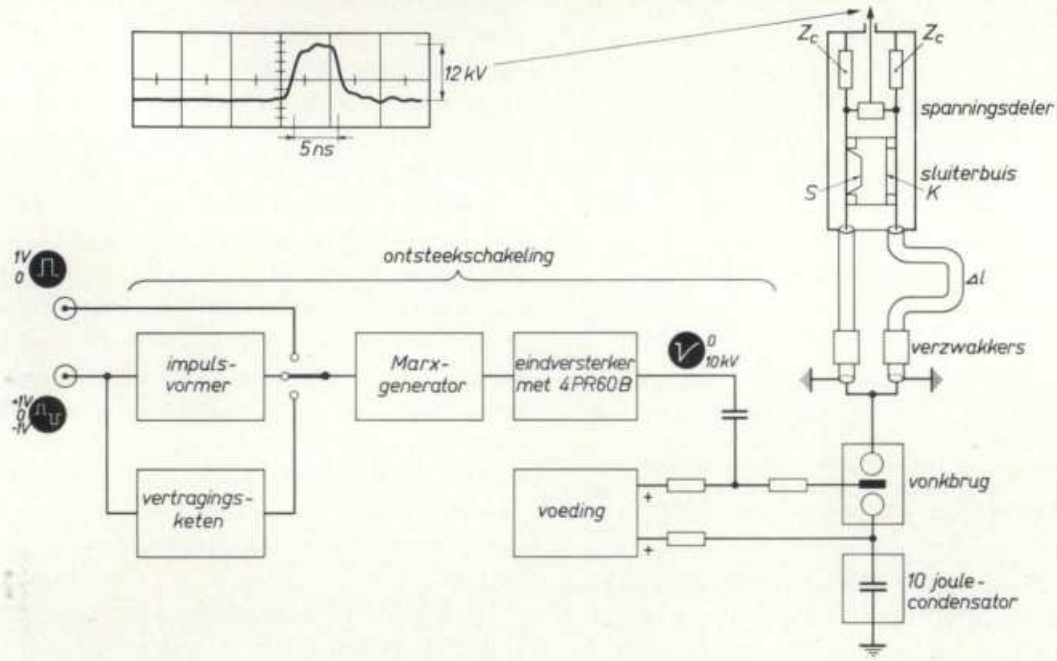


Fig. 6. Blokschema van de camera voor een belichtingstijd van 5-500 ns. De op verschillende punten optredende impulsvormen zijn schematisch aangegeven. Links boven een meer gedetailleerd diagram van de uitgangsimpuls van de spanningsdeler.

De belangrijkste onderdelen van de schakeling die de hoogspanningsimpuls levert zijn de condensator en de vonkbrug. Bij de condensator is vooral van belang dat de zelfinductie van de toevoerleidingen uiterst gering is. De capaciteit bedraagt 0,1 μF, er wordt een energie van ongeveer 10 joule in opgeslagen, en de zelfinductie van de toevoerleidingen bedraagt niet meer dan 2 nH. Deze condensator wordt gefabriceerd door de Engelse firma Hivotronic.

De vonkbrug met drie elektrodes bestaat in feite uit een combinatie van twee in serie geschakelde vonkbruggen met twee elektrodes. Vóór de vonkoverslag bezit de gemeenschappelijke elektrode een zeer hoge ingangsimpedantie, overeenkomende met een condensator van 2-3 pF. Hierdoor wordt het mogelijk de hoogspanningsimpuls door een vacuümbuis te laten leveren, en men vermijdt de vertraging die bij gebruik van een met gas gevulde buis door ionisatieverschijnselen zou ontstaan. De voor het opbouwen van de stroom nodige tijd is vrijwel evenredig met de elektrodenafstand [6]. Om deze tijd kort genoeg te houden, moet de elektrodenafstand van de orde van enige tienden millimeter zijn, hetgeen met zich meebrengt dat de gasdruk in de omhulling van de vonkbrug tot ongeveer 15 bar moet worden opgevoerd.

Bij de vonkoverslag kan men twee etappes onderscheiden: de ionisatie en de ontlading. De ionisatietijd en de fluctuaties hiervan hangen in hoofdzaak af van de overspanningsverhouding, d.i. de verhouding tussen de spanning aangelegd tussen de elektrodes en de doorslagspanning. In *fig. 7* is het verloop van de ionisatietijd en de fluctuaties hiervan als functie van de overspanningsverhouding weergegeven. Gedurende de ontlading bestaat het vervangschema van de vonkbrug uit een ideale schakelaar in serie geschakeld met een zelfinductie, waarvan de waarde evenredig is met de elektrodenafstand. De evenredigheidsconstante wordt in hoofdzaak bepaald door de sterkte van de stroom die door de vonk vloeit. In geringere mate hangt de constante af van de aard van het gas en van vorm en aard van de elektrodes, maar hij is vrijwel onafhankelijk van de druk. Voor een stroom van ongeveer 500 A is de evenredigheidsconstante van de orde van 45 nH/mm.

We hebben de invloed van een aantal parameters, en vooral van de elektrodenafstand, op de nuttige levensduur van de vonkbrug nagegaan. Gevonden werd dat de vonkbrug een langere levensduur heeft naarmate de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

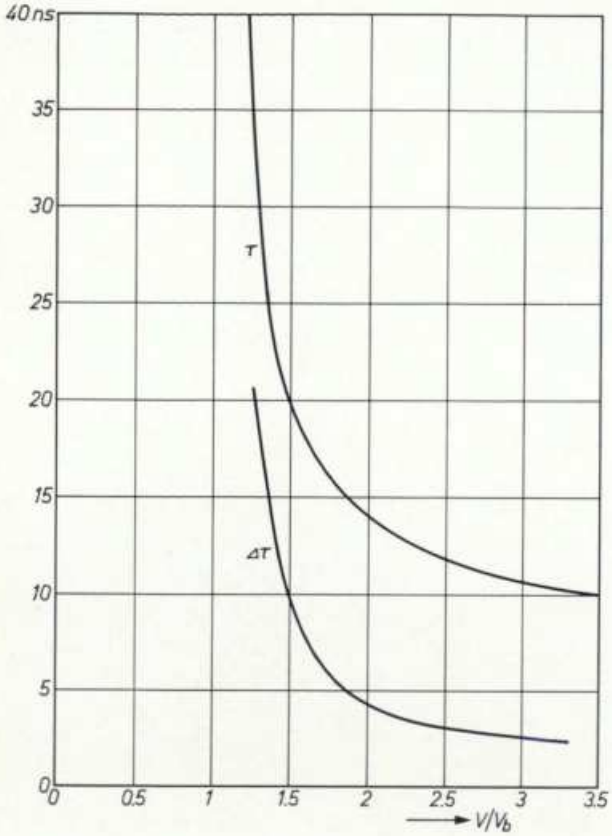


Fig. 7. Verloop van de ionisatietijd τ en de fluctuatie $\Delta\tau$ hiervan als functie van de overspanningsverhouding (aan de elektrode aangelegde spanning V gedeeld door de doorslagspanning V_b).

elektrodenafstand groter is. Bij de keuze van de elektrodenafstand is derhalve een compromis tussen een lange levensduur en een korte stijgtijd vereist. Bij de hier beschouwde camera wordt met een elektrodenafstand van 0,3-0,4 mm een stijgtijd van minder dan 1,5 ns verkregen, en de vonkbrug werkt nog bevredigend na 30 000 ontladingen.

De belangrijkste eigenschappen van de camera kunnen nu als volgt worden beschreven. De hoogspanningsimpuls die op de sluiter wordt gezet heeft een amplitude van 10-15 kV, een duur van 5-500 ns, een stijgtijd van 1,5 ns en een daaltijd van 10% van de impulsduur. De ontsteekvertraging bedraagt 35 ns met een fluctuatie van 3 ns. De maximaal toelaatbare herhalingsfrequentie is één opname per minuut.

Een camera met soortgelijke eigenschappen wordt thans ontwikkeld door SODERN (zie blz. 218). Hierbij wordt een ingesmolten vonkbrug toegepast, waardoor het werken met de camera wordt vereenvoudigd.

Beproevingsopstellingen voor belichtingstijden tussen 5 en 500 ns

Ten dienste van de ontwikkeling van elektronische sluiters hebben wij twee beproevingsopstellingen gebouwd, die in feite niets anders zijn dan experimentele camera's: een opstelling voor enkeltrapsbuizen met een diameter tot 120 mm en een andere voor tweetrapsbuizen. De schakelingen zijn geheel analoog als boven beschreven.

In *fig. 8* is de beproevingscamera voor buizen met een diameter tot 120 mm weergegeven. De amplitude van de hoogspanningsimpuls kan worden ingesteld tussen 8 en 30 kV. Voor het bereiken van de gewenste korte belichtingstijd moet men rekening houden met de volgende moeilijkheden: 1) de capaciteit van de buis, die ruwweg 100 pF bedraagt, 2) de aanpassingsfout die veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van zulk een grote buis in een lintleiding die geschikt moet zijn om elders aan coaxiale kabels te worden aangesloten. We hebben een lintleiding ter breedte van 230 mm gekozen. Wegens het gewicht van de buis kunnen de aansluitingen hiervan moeilijk in de lintleiding ingebouwd worden. Anderzijds moet deze leiding het verlengde vormen van een coaxiale kabel van type RG 214 U met 50 Ω impedantie, waarvan het diëlektricum een uitwendige diameter van 7,2 mm heeft. Het is geen gering probleem de overgang van deze kabel naar de lintleiding zodanig te maken dat een goede aanpassing van de karakteristieke impedantie wordt verkregen en een voldoende diëlektrische sterkte om 30 kV te kunnen uithouden. Ondanks deze moeilijkheden hebben wij een belichtingstijd van minder dan 10 ns bereikt. Voor het overige zijn de prestaties dezelfde als van de eerder beschreven camera.

Fig. 9 toont de beproevingscamera voor tweetrapsbuizen. Deze bevat twee in een enkele kast ondergebrachte maar onafhankelijk bestuurde generatoren, waarvan de ene de eerste trap en de andere de tweede trap van de te onderzoeken sluiterbuis bedient. De generator voor de eerste trap is identiek met die van de reeds beschreven camera. Hij bevat echter ook een mogelijkheid om de aan de buis gelegde spanning tussen 8 en 15 kV te variëren. De aan de tweede trap gelegde hoogspanningsimpuls moet een vrij grote impulslengte bezitten wegens de nalichtduur van het fluorescentiescherm van de eerste trap. De duur van deze impuls kan worden gevarieerd tussen 1 en 100 μs en zijn amplitude tussen 8 en 15 kV.

Camera voor belichtingstijden van 1-2 ns

We zullen nu een toestel beschrijven dat tot de tweede categorie van camera's behoort en waarmee buitengewoon korte belichtingstijden mogelijk zijn. De thans bereikte minimale belichtingstijd is 1 ns. Verwacht wordt dat binnenkort de grens tot 0,3 ns zal worden opgeschoven.

Een camera van deze categorie bevat weer als hoofdonderdelen het optische gedeelte met de beeldtransformatorbuis en de hoogspanningsimpulsgenerator

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(*fig. 10*). De beeldtransformatorbuis, die met de ingangsoptiek, de heraf beeldingsoptiek en het fototoestel tot een geheel is verenigd, is in de bovenste helft van de figuur te zien. Voor het scherpstellen van het beeld op de fotokatode wordt een reflexzoeker gebruikt. In de kast in de onderste helft van fig. 10 bevinden zich de elektronische stuurschakelingen. Deze bestaan in hoofdzaak uit een impulsversterker en een hoogspanningsimpulsgenerator, die elke keer als hij een startimpuls ontvangt een enkele impuls met een amplitude van 12 kV en een duur van 1 of 2 ns (gemeten op halve tophoogte) levert. De impulsvormende leiding bevindt zich in de horizontale cilinder, die kan worden verwijderd.

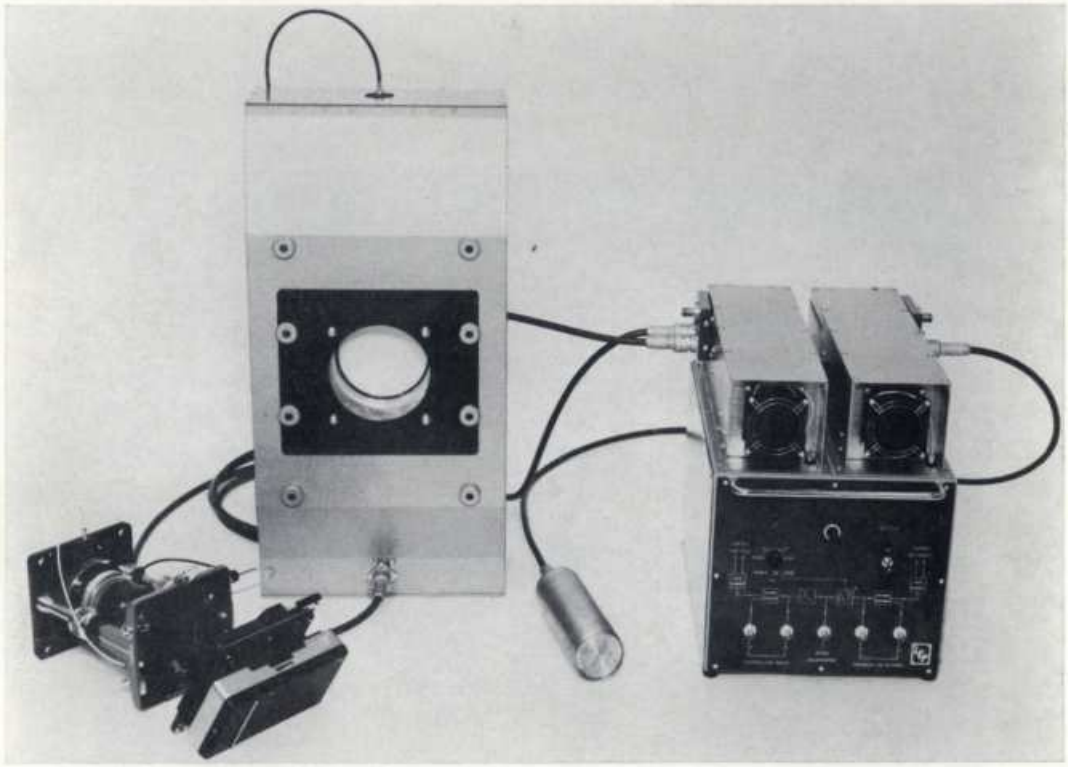


Fig. 8. Beproevingsopstelling voor enkeltrapsbuizen met een diameter van 120 mm.

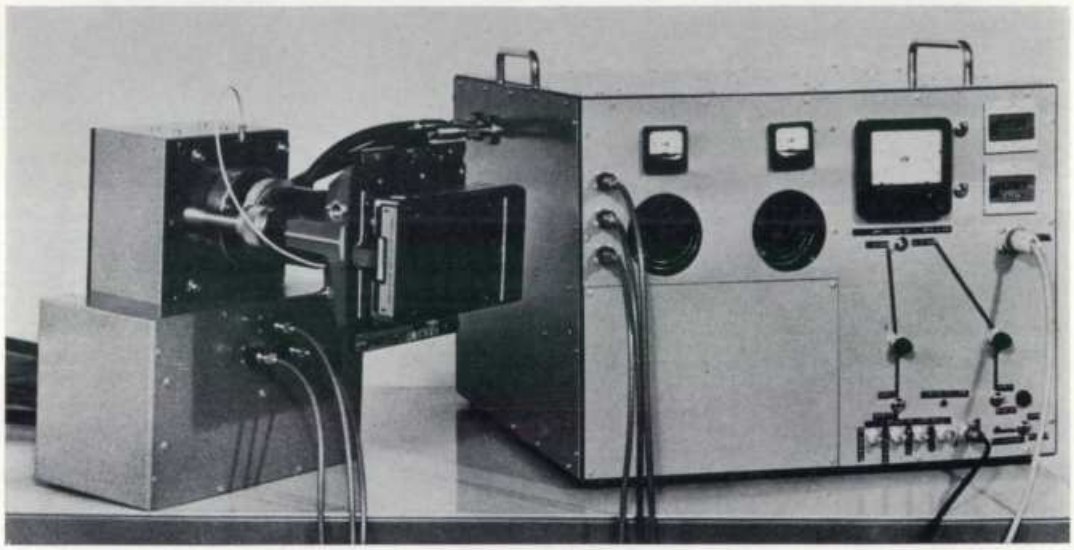


Fig. 9. Beproevingsopstelling voor tweetrapsbuizen.

Hoe men met de camera werkt, moge worden toegelicht aan het voorbeeld van een eenmalig, op een wille-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

keurig tijdstip optredend, lichtverschijnsel. Dit kan b.v. een doorslag in lucht zijn die wordt veroorzaakt door focussering van de bundel van een met impulsen gevoede laser. Het in werking stellen van de camera kan hier gebeuren door een spanningsimpuls van geringe sterkte (b.v. 6-10 V) die verkregen wordt uit een fotocel waarop men een gedeelte van de uit de laser tredende lichtbundel laat vallen. Het beeld van het lichtverschijnsel moet dan in een optische vertragingslijn worden opgeslagen gedurende een tijd die minstens gelijk is aan de startvertraging van de camera. In ons geval hebben de gebruikte optische vertragingslijnen vertragingstijden van ongeveer 35 ns. Het is derhalve absoluut noodzakelijk dat de impuls van 12 kV die de sluiter open doet gaan met een vertraging van hoogstens 35 ns op de buis komt te staan.

Een andere belangrijke eigenschap van de camera is de fluctuatie van deze vertraging. Wil men een lichtverschijnsel nader onderzoeken, dan moet men in staat zijn het tijdstip van de belichting ten opzichte van de startimpuls die de camera ontvangt (dat wil zeggen ten opzichte van het onderzochte verschijnsel) in stappen van b.v. 1 ns op te schuiven. De fluctuaties stellen een grens aan de nauwkeurigheid waarmee dit opschuiven kan gebeuren, en ze vormen derhalve een even belangrijke eigenschap als de startvertraging. In de hier beschreven camera hebben we de fluctuaties kunnen reduceren tot ongeveer 3 ns.

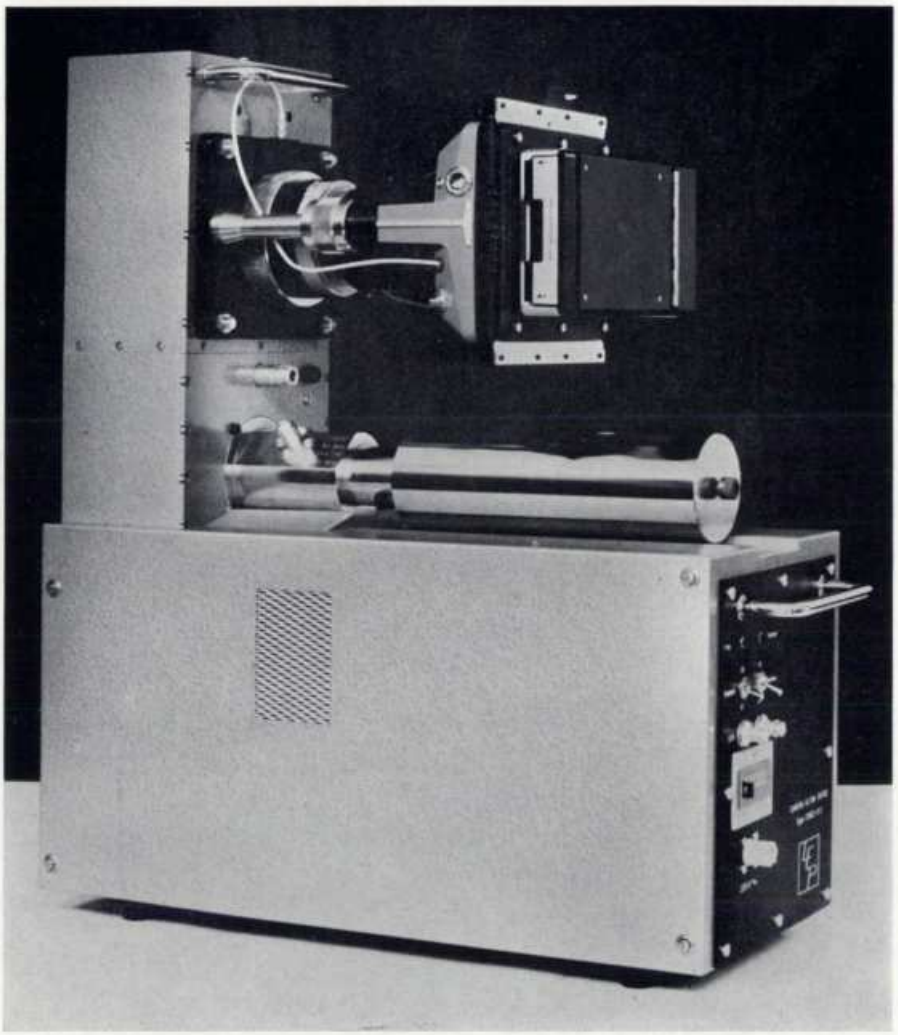


Fig. 10. Camera voor een belichtingstijd van 1-2 ns. De horizontale cilinder in het midden bevat de impulsvormende leiding.

Aan de hand van het schakelschema *fig. 11* kan men zien hoe het ontwerp van de camera is beïnvloed door het streven naar een beperking van de vertragingstijd en de fluctuatie daarvan in elke versterkertrap. Het geheel omvat de volgende schakelingen:

1) Een Marx-stootspanningsgenerator, die met avalanche-transistors werkt. De belangrijkste eigenschappen van deze schakeling zijn de hoge gevoeligheid,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de zeer korte vertraging (minder dan 5 ns) en de verwaarloosbaar geringe fluctuaties (0,2 ns). De amplitude van de geleverde impuls kan zonder moeite een waarde van 1 kV bereiken bij een stijgtijd van 2 ns. Een moeilijkheid ontstaat bij de koppeling van de generator aan de hierop volgende vacuümbuis, aangezien de ingangsimpedantie van deze buis gelijk is aan die van een condensator van ongeveer 50 pF, hetgeen bij een stijgtijd van 2 ns leidt tot stromen van ongeveer 20 A. Zulk een waarde is met transistors moeilijk te realiseren en men moet derhalve een compromis sluiten tussen de stijgtijd van de uitgangsimpuls en de betrouwbaarheid van de werking. We hebben op de uitgang van de Marx-generator een serieweerstand aangesloten, waardoor onze schakeling een stijgtijd van ongeveer 5 ns gekregen heeft.

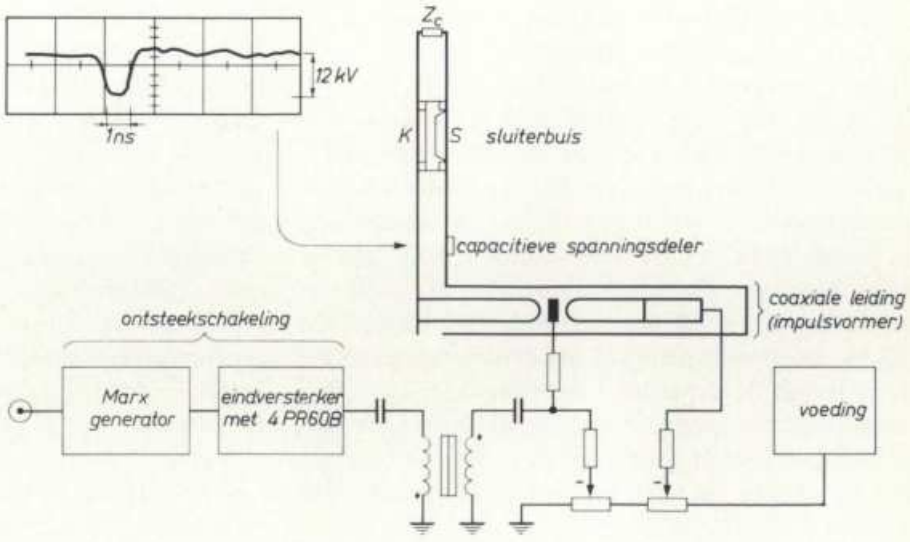


Fig. 11. Blokschema van de camera voor een belichtingstijd van 1-2 ns. Evenals in fig. 6 is links boven een diagram van de uitgangsimpuls van de spanningsdeler weergegeven.

2) Een eindversterker met een vacuümbuis type 4 PR 60 B. Deze levert de gewenste uitgangsimpuls van 15 kV met het vereiste vermogen (15 A bij een stijgtijd van 5 ns op een condensator van 5 pF). Voor het sturen van deze buis is een roosterspanning van 1 kV vereist. Een met gas gevulde buis (b.v. een thyratron met gloeikatode of koude katode) zou dezelfde prestaties kunnen leveren, maar de vacuümbuis heeft het voordeel dat hij een vertraging van minder dan 10 ns introduceert, die vrijwel geen fluctuaties vertoont, terwijl een met gas gevulde buis een vertraging van 100-200 ns zou geven, met fluctuaties van 20-50 ns.

3) Een vonkbrug met drie elektrodes, ingebouwd in een coaxiale structuur, die aan een kant een open leiding bevat die als impulsvormer fungeert, met een elektrische lengte van 1 of 2 ns, en aan de andere kant een transmissieleiding die via een zeer zorgvuldig aangepaste overgang verbonden is met een lintleiding die de koppeling met de sluiterbuis mogelijk maakt. De karakteristieke impedantie van het geheel is 25 Ω. De gelijkspanning waartoe de impulsvormende leiding wordt geladen kan tot 30 kV bedragen (voor een impuls van 15 kV die op de buis wordt gezet). De vonkbrug werkt in een atmosfeer van zeer zuivere stikstof onder een druk van 40 tot 50 bar.

Om de stijgtijd van 300-400 ps te realiseren, die nodig is om de belichtingstijd tot 1 ns te kunnen verminderen, moest zoals reeds vermeld een elektrodenafstand van de orde van 1/10 mm in acht worden genomen. Dit bracht een hele reeks van moeilijke problemen mee. De vonkbrug moet mechanisch sterk genoeg zijn om een druk van 50 bar te kunnen weerstaan, terwijl toch een snelle verandering van belichtingstijd mogelijk moet blijven; er mag geen doorslag optreden bij gelijkspanningen tot 30 kV; de aanpassingsfout moet verwaarloosbaar klein zijn; de instellingen van de vonkbrug moeten na iedere verandering van belichtingstijd voldoende reproduceerbaar zijn; de levensduur moet voldoende lang zijn, ondanks de optredende vonkerosie en de zeer kleine afstand tussen de elektrodes; ten slotte mogen geen spontane of ontijdige ontstekingen optreden.

Door de invloed van iedere parameter van de impulsvormende schakeling uiterst nauwkeurig te onderzoeken, hebben we kunnen bereiken dat het systeem aan ieder van de bovengenoemde eisen zo goed mogelijk voldoet. Door uiterst stringente mechanische toleranties aan te houden, de oppervlakken van alle onderdelen nauwkeurig te controleren en de grootste zorgvuldigheid bij het monteren te betrachten, is het gelukt een bevredigende reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid te bereiken. De verkregen prestaties kunnen als volgt worden samengevat:

a) Totale ontsteekvertraging minder dan 30 ns.
b) Fluctuaties hiervan minder dan 3 ns.
c) Minder dan 2% spontane ontstekingen. Overigens kunnen wij ongewenste ontstekingen ook volledig onderdrukken door een systeem waarbij de hoogspanning automatisch wordt uitgeschakeld; bij dit systeem moet de camera een seconde voor men

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze wil gebruiken „op scherp" worden gesteld.

d) Levensduur meer dan 50 000 ontladingen.
e) Stijg- en daaltijd ongeveer 350 ps.
f) Aan de buis optredende parasitaire signaalamplitudes minder dan 10% van de impulsamplitude.

De aan de sluiterbuis toegevoerde elektrische impuls wordt gemeten door een capacitieve spanningsdeler, die in de buurt van de buis in de lintleiding wordt geschakeld. Deze spanningsdeler veroorzaakt een initiële verzwakking van 54 dB, met een intrinsieke stijgtijd van 0,2 ns. De moeilijkheid was dat dit moest worden bereikt terwijl de capacitieve spanningsdeler een „tijdconstante" van ongeveer 5 ns moest hebben (de tijdconstante is hier de tijd gedurende welke de spanningsdeler fouten in het spanningsverloop van minder dan 5% introduceert).

Fig. 12 toont de overgang tussen de impulsvormende coaxiale leiding en de lintleiding; men ziet hoe de buis in de lintleiding is ingebouwd.

Resumerende kunnen we vaststellen dat met de hierboven beschreven camera's opnamen van volledige beelden kunnen worden gemaakt met de volgende speciale eigenschappen: zeer korte belichtingstijden, b.v. 1 ns; varieerbaarheid van de belichtingstijd in een zeer groot gebied, b.v. 1-500 ns; zeer geringe ontsteekvertraging en geringe fluctuaties hiervan (resp. 30 en 3 ns); zeer aanzienlijke lichtversterking; en nagenoeg volledige afwezigheid van vervorming. Vooral door de laatstgenoemde eigenschap bieden de beschreven camera's belangrijke perspectieven voor allerlei toepassingen zoals driekleurendruk, optische terugkoppeling [12] en reliëffotografie. Bij al deze toepassingen moeten verschillende beelden op elkaar worden gesuperponeerd, hetgeen reeds bij een heel geringe vervorming niet goed mogelijk is.

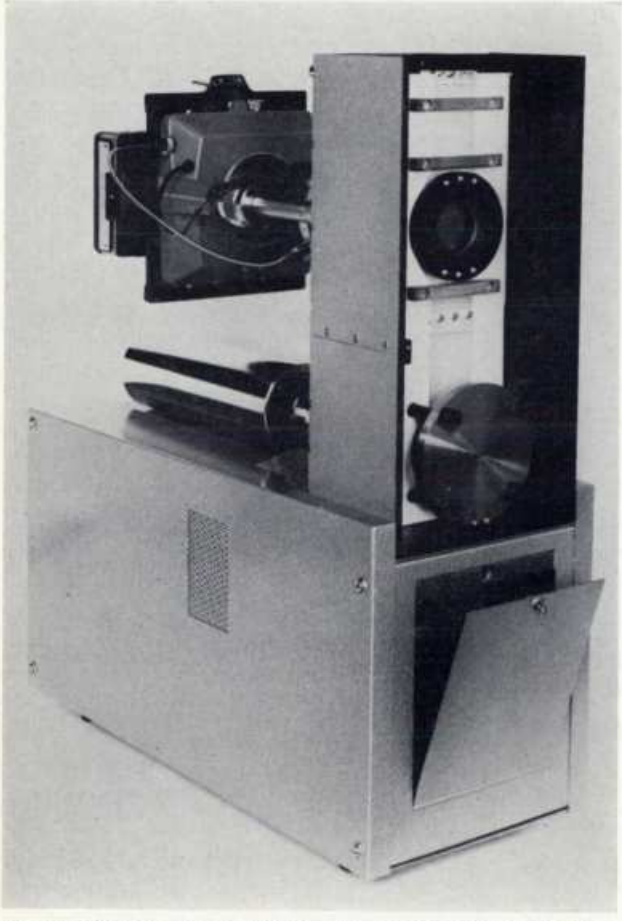


Fig. 12. Dezelfde camera als in fig. 10, van de andere kant gezien, zodat de overgang tussen de coaxiale leiding en de lintleiding zichtbaar is, evenals de wijze waarop de sluiterbuis in de lintleiding is ingebouwd.

Wat de verdere verbetering van de camera's betreft, kan men denken aan de volgende mogelijkheden: de ontwikkeling van helderheidsversterkers met elektronenmultiplicatorpijpen, die een aanzienlijk grotere lichtversterking zullen geven; de ontwikkeling van nieuwe supersnelle buizen waarbij de gevoelige lagen (fotokatode en fluorescentiescherm) rechtstreeks met een lintleiding zijn geïntegreerd, waardoor de belichtingstijd tot ongeveer 300 ps zal kunnen worden verlaagd; de ontwikkeling van nieuwe soorten vonkbruggen, met een ontsteking die zal waarborgen dat de ontsteekfluctuaties niet meer dan 300 ps zullen bedragen; een miniaturisatie van het optische gedeelte, waardoor verschillende sluiterbuizen in een kleine ruimte gegroepeerd kunnen worden, om volledige beelden van hetzelfde verschijnsel in een aantal opeenvolgende stadia op te nemen.

[12] M. L. Perl en L. W. Jones, The regeneration image intensifier and its application to the luminescent chamber, Proc. 4th Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1968.

Samenvatting. Na een kort overzicht van de verschillende soorten camera's die voor ultrasnelle fotografie kunnen worden gebruikt, worden verschillende als sluiter dienende beeldtransformatorbuizen en camera's beschreven die in het LEP zijn ontwikkeld en vervaardigd. De sluiterbuizen zijn van het vlakke-diodetype en kunnen een diameter van 38 mm, 60 mm of 120 mm hebben. Zij leveren een lichtversterking, die nog aanzienlijk kan worden vergroot door gebruik te maken van elektronenmultiplicatorpijpen of door twee enkeltrapsbuizen in cascade te schakelen. De camera's ontwikkeld in het LEP kunnen worden verdeeld in twee categorieën: a) Camera's met belichtingstijden van 5-500 ns; er wordt een korte beschrijving gegeven van een uitvoering met een enkeltrapsbuis met een diameter van 38 mm, een tweetrapsuitvoering met een diameter van 35 mm, en een enkeltrapsuitvoering met een diameter van 120 mm. b) Camera's met belichtingstijden van de orde van 1 ns. Hiervan zijn twee uitvoeringen gemaakt, met een belichtingstijd van resp. 1 ns en 2 ns, waarbij een enkeltrapsbuis met een diameter van 38 mm wordt toegepast. Verwacht wordt dat een camera met een belichtingstijd van 300 ps gerealiseerd zal kunnen worden. Al deze camera's worden in werking gesteld door een elektrische impuls met een amplitude van enige volts. De ontsteekvertraging is 35 ns, en de fluctuaties hiervan, die thans 3 ns bedragen, zullen dank zij verdere verbeteringen op het gebied van uiterst snelle vonkbruggen verminderd kunnen worden tot ongeveer 300 ps. Belangrijke eigenschappen van deze camera's zijn enerzijds de lichtversterking en de afwezigheid van beeldvervorming, anderzijds het grote gebied waarin de belichtingstijd kan worden gevarieerd en de geringe en weinig fluctuerende ontsteekvertraging.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het vervaardigen van elektronenmultiplicatorpijpen en pijpenplaatjes

G. Eschard en R. Polaert

Inleiding

De elektronenmultiplicatorpijp heeft een snelle ontwikkeling doorgemaakt. Hij biedt aantrekkelijke mogelijkheden, met name als helderheidsversterker bij foto-elektrische buizen en als deeltjesdetector voor gebruik in het ruimteonderzoek [1][2]. De multiplicatorpijp berust op de secundaire emissie die optreedt aan een halfgeleidend oppervlak als hier elektronen op vallen. Terwijl bij de conventionele elektronenmultiplicator achtereenvolgens secundaire emissie optreedt aan *verschillende* dynodes, heeft men bij de multiplicatorpijp één continu doorlopende „dynode", daar hierbij de binnenwand van een glazen buisje, bedekt met een halfgeleidende laag, als zodanig fungeert. Tussen de uiteinden van dit buisje of pijpje wordt een spanning aangelegd, zodat in het pijpje een homogeen elektrisch veld ontstaat. Indien de binnenkant van het pijpje door een elektron of een ioniserend deeltje wordt getroffen, kunnen verscheidene secundaire elektronen worden vrijgemaakt. Deze elektronen worden versneld door het elektrische veld en volgen daardoor een parabolische baan; ze treffen de binnenkant van het pijpje dan weer op een ander punt, waar ze op hun beurt de emissie van een aantal elektronen veroorzaken. Afhankelijk van de voedingsspanning en van de lengte en de diameter van het pijpje kan dit proces zich vele malen herhalen; het aantal elektronen aan de uitgang van het pijpje kan op deze wijze tot 10^7 maal zo groot zijn als aan de ingang.

In de praktijk gebruikt men in plaats van een enkele multiplicatorpijp een groot aantal microscopisch dunne, tot een bundel verenigde pijpjes. Snijdt men uit deze bundel, loodrecht op de richting van de pijpjes, een schijfje, dan ontstaat een „pijpenplaatje", een nieuw elektronisch onderdeel, dat voor vele doeleinden bruikbaar is. Pijpenplaatjes kan men b.v. gebruiken

1) in fotomultiplicators, ter verhoging van de responsiesnelheid door vermindering van de totale looptijd van de elektronen [3];
2) in beeldversterkerbuizen, waar men hierdoor zeer grote versterkingsfactoren kan bereiken bij geringe afmetingen en lage voedingsspanning [4][5];
3) in katodestraalbuizen, ter verhoging van de schrijfsnelheid.

G. Eschard, ingénieur E. S. E., Dr. Ing., en R. Polaert, ingénieur H. E. I., Dr. Ing., zijn medewerkers van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Na enkele beschouwingen over aantal en afmetingen van de pijpjes in een plaat en over de te gebruiken materialen, zullen we in dit artikel verschillende algemene methodes ter vervaardiging van de pijpenplaatjes beschrijven. De ontwikkeling van deze methodes heeft in het LEP plaatsgevonden in nauwe samenwerking met de Mullard Research Laboratories te Salfords, Engeland, en het Philipslaboratorium te Eindhoven.

De dimensionering van de pijpenplaatjes

Bij de pijpenplaatjes voor beeldversterkers worden diameter en aantal van de pijpen bepaald door het scheidend vermogen en de beeldgrootte die men wil bereiken. Voor een beeld van b.v. 40×40 mm met 400 lijnen is een plaatje nodig met minstens 64×10^4 pijpen, die een diameter van minder dan 40 μm moeten hebben. Om precies te zijn, moet men ook nog rekening houden met de wanddikte, met de stapeling van de pijpen, met de elektronenoptiek die voor en achter het plaatje wordt toegepast, en met de korrel van het scherm.

De lengte van de pijpen, of wat op hetzelfde neerkomt: de dikte van het plaatje, wordt bepaald door de gewenste versterking (vermenigvuldiging van het aantal elektronen). Theoretisch kan men afleiden dat de versterking van een pijpenplaatje in hoofdzaak afhangt van de verhouding tussen lengte en diameter van elke pijp; deze verhouding ligt tussen 40 en 60.

De keuze van het materiaal

Als basismateriaal voor de multiplicatorpijpen wordt *glas* gekozen, wegens het gemak waarmee van dit materiaal buizen getrokken kunnen worden, en wegens het goede gedrag van glas in vacuümbuizen. Glas is evenwel in het algemeen een zeer goede isolator,

[1] W. C. Wiley en C. F. Hendee, Electron multipliers utilizing continuous strip surfaces, IRE Trans. **NS-9**, no. 3, 103-106, 1962.
[2] Zie J. Adams en B. W. Manley, De elektronenmultiplicatorpijp, een nieuwe stralingsdetector, Philips techn. T. **28**, 256-261, 1967.
[3] J. Nussli, Fotomultiplicators en de transfertechniek, blz. 241 in dit nummer.
[4] A. Guest, R. T. Holmshaw en B. W. Manley, Channel multiplier plates for imaging applications, Proc. 4th Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1968.
[5] G. Eschard en J. Graf, Quelques problèmes concernant les multiplicateurs canalisés pour intensificateur d'image, Proc. 4th Symp. on Photoelectronic image devices, Londen 1968.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zodat voor de onderhavige toepassing een kunstgreep moet worden toegepast waarmee het geleidingsvermogen wordt verhoogd [6]. Dit kan gebeuren door aan de binnen kant van de buis een geleidende laag aan te brengen; deze methode is echter door de zeer kleine diameter van de pijpjes moeilijk toepasbaar. Eenvoudiger is het, een speciale glassamenstelling te gebruiken waarbij een voldoend geleidingsvermogen van het massieve materiaal of langs het oppervlak verkregen wordt door elektronen- of ionengeleiding.

De fabricagemethode

De bundel van miljoenen microscopisch nauwe glazen pijpjes kan op verschillende wijzen worden vervaardigd.

1) Men kan een glazen schijf perforeren, b.v. langs fotografische weg of door elektronenbombardement.
2) Men kan een holle glazen buis trekken tot de vereiste microscopisch kleine diameter is bereikt, de buis daarna in gelijke stukjes snijden en deze tot een bundel verenigen.
3) Men kan een glazen buis met vaste kern uittrekken en afgesneden pijpjes hiervan tot een bundel samenpersen.

Alleen aan de laatste twee methodes is bij het technologische onderzoek in het LEP aandacht besteed.

Trekken van een holle glazen buis

Een glazen buis die is verhit tot de verwekingstemperatuur kan men tot een microscopisch kleine diameter uittrekken. Voor het vervaardigen van een pijpenplaatje wordt deze dunne buis opgerold op een trommel en vervolgens in gelijke stukken gesneden, die met behulp van een email worden aaneengekit tot een bundel. Deze bewerking kan op twee manieren worden uitgevoerd.

1) Men kan de buis in één bewerking tot de gewenste diameter trekken; dit wordt in het algemeen gedaan voor pijpen met een diameter van meer dan 200 μm.
2) Men kan het trekken in twee of drie trappen uitvoeren, waarbij na elke trap een bundel wordt gevormd, die in de volgende trap verder wordt uitgetrokken. Dit maakt het gemakkelijker een regelmatige stapeling van de buizen te krijgen.

Voor het trekken van pijpen met een diameter van minder dan 100 μm gebruiken we bij voorkeur de tweede methode. Weliswaar kan men pijpjes van deze diameter ook rechtstreeks door trekken maken, maar de relatieve wanddikte wordt dan te groot. Wanneer de buis nl. de warme zone van de trekoven passeert, vermindert de viscositeit van het glas, zodat de buis kan worden uitgerekt, maar tegelijkertijd krijgt door de kleiner wordende kromtestraal de oppervlakspanning van het glas meer invloed, wat tot gevolg heeft dat de relatieve wanddikte van de buis toeneemt. Dit is nadelig voor het detectierendement van het pijpenplaatje: voor een goed rendement is het immers van belang dat aan de ingangszijde van het pijpenplaatje zoveel mogelijk elektronen de pijpjes kunnen binnentreden om aan de vermenigvuldiging deel te nemen. Voor het verkrijgen van een zo groot mogelijke inwendige diameter van de pijpen hebben we een methode ontwikkeld waarbij tijdens het trekken de buis met gas onder een geringe overdruk gevuld is; hiermee wordt een nuttige doorsnede van 80% bereikt.

Voor het trekken en bundelen van de zeer nauwe pijpjes in verschillende trappen gaan we als volgt te werk. Eerst wordt een glazen buis getrokken tot een diameter van minder dan 1 mm. Deze pijp wordt op een trommel opgerold en daarna in gelijke stukken gesneden, die worden gebundeld en in een zeshoekige vorm geplaatst. Deze vorm wordt daarna in een oven gezet, waarin de pijpjes, die te voren zijn geëmailleerd, aaneen worden gekit. Indien de pijpjes alle dezelfde diameter hebben, komen ze in de vorm vanzelf in een geheel regelmatig patroon te staan. Het aantal pijpen dat de zeshoekige vorm bevat volgt uit de relatie:

$$N = 1 + 3m(m + 1),$$

waarin m het aantal pijpen is dat een zijde van de zeshoek beslaat.

Deze bundel wordt nu onderworpen aan de tweede trekbewerking, waarbij de diameter van de pijpjes verder wordt verkleind. De bundel kan hierbij niet meer op een trommel worden opgerold; de voortbeweging gebeurt eenvoudig door twee tegen elkaar gedrukte drijfriemen.

Fig. 1 toont de doorsnede van een pijpenplaatje dat met deze methode is vervaardigd.

De regelmaat in de afmetingen van het eindprodukt wordt bij beide methodes bepaald door de constantheid van de snelheden waarmee de buis en de bundel worden uitgetrokken, en door de stabiliteit van de oventemperatuur.

Gebruik van een buis met vaste kern

Men kan ook uitgaan van een glazen buis met een vaste kern, die dan na afsnijden van een pijpenplaatje wordt opgelost. Deze methode biedt vele voordelen: de buisjes zijn minder breekbaar en daardoor gemakkelijker te hanteren; ze kunnen bij het bundelen onder grote druk worden samengevoegd zonder gevaar voor platdrukken of vervormen; in het eindprodukt hebben alle afzonderlijke pijpjes dezelfde diameter en leveren derhalve dezelfde versterking.

Als kern kan men *metaal* of een *oplosbaar glas* gebruiken. In het eerste geval plaatst men in een glazen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

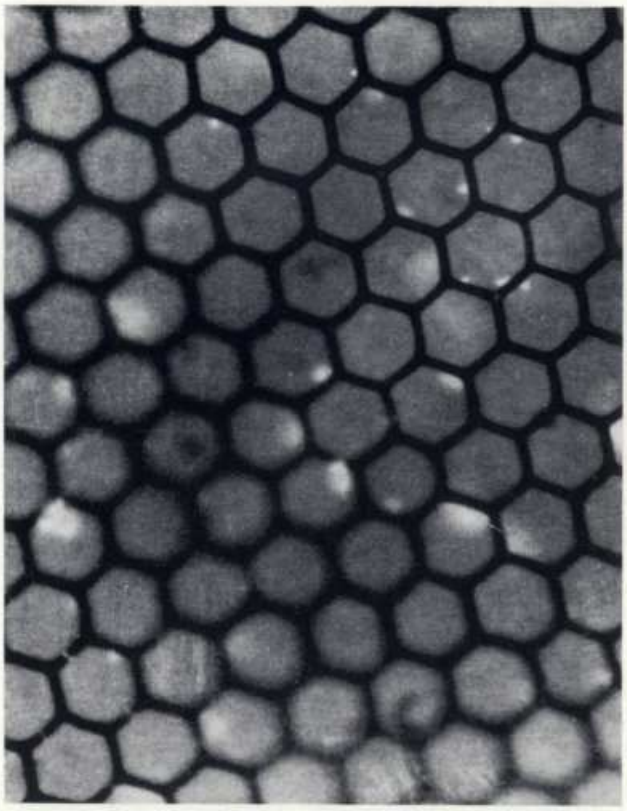


Fig. 1. Loodrechte doorsnede door een pijpenplaatje dat is vervaardigd door een glazen buis in twee trappen te trekken. Diameter van de pijpjes 40 μm. Door tijdens het trekken de buis met gas onder een geringe overdruk te vullen, krijgen we een nuttige doorsnede van de plaat van 80%.

buis een metaaldraad met een diameter precies gelijk aan de gewenste inwendige diameter van de multiplicatorpijp. De buis wordt dan in een oven gebracht en zover uitgetrokken tot hij de metaaldraad omsluit en de wanddikte tot de gewenste waarde is verminderd. De aldus verkregen pijp wordt rechtstreeks op een achthoekige trommel gewikkeld; de windingen moeten elkaar raken. Dan wordt de wikkeling in acht delen gesneden, die tot een rechthoekig blok aaneen worden gevoegd, en het blok wordt — nog steeds bij hoge temperatuur — onder hoge druk samengeperst, zodat de pijpjes met elkaar versmelten. Het wordt dan in dunne plakjes gesneden, die de gewenste pijpenplaatjes vormen. Ten slotte wordt het in elk pijpje aanwezige metaal langs chemische of elektrolytische weg verwijderd.

Met deze methode verkrijgt men buitengewoon uniforme pijpjes, zie *fig. 2*.

In het tweede geval heeft men een buis met een kern van oplosbaar glas, die in hun geheel worden uitgetrokken. Dit is in feite een modificatie van de methode die wordt toegepast voor het vervaardigen van glasvezels voor vezeloptieken [7]. Alleen wordt in ons geval de keuze van de glassoorten niet bepaald doordat men verschillende brekingsindices nodig heeft, maar doordat het glas van de kern oplosbaar moet zijn, terwijl men voor het glas van de mantel bepaalde elektrische eigenschappen wenst. Evenals bij de fabricage van vezeloptieken wordt het trekken hier in een aantal trappen uitgevoerd; de regelmaat in de diameter van de buisjes is weliswaar minder dan bij de methode met metaalkern, maar het resultaat is toch alleszins bevredigend.

Het in de hand houden van de diameter van de glazen pijpjes

Uit het bovenstaande komt duidelijk de noodzaak naar voren om tijdens het trekken de diameter van de buis nauwkeurig onder controle te houden; dit om een regelmatige rangschikking van de pijpjes te krijgen, en om voor alle pijpjes een gelijke versterking te waarborgen.

De diktemeting wordt bemoeilijkt door de breekbaarheid van het glas en door de hoge temperatuur en de snelheid waarmee de buis uit de oven komt. Het is, vooral bij de holle buizen, onmogelijk om langs mechanische weg te meten. In ons laboratorium is voor deze meting een zuiver optische methode ontwikkeld

Fig. 2. Loodrechte doorsnede door een pijpenplaatje dat is vervaardigd uitgaande van een glazen buis met metalen kern. Diameter van de pijpjes 80 μm.

[6] H. J. L. Trap, Les effets de quelques traitements conventionnels sur la conductibilité superficielle du verre, Verres et Réfr. **23**, 28-37, 1969 (no. 1).

[7] Zie b.v. N. S. Kapany, Fiber optics; principles and applications, Academic Press, New York 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(*fig. 3*). De buis wordt hierbij dwars door een homogene lichtbundel gevoerd, die uit een collimator komt en op een fotocel valt. Een helft van de bundel is tevoren afgesplitst en valt op een tweede fotocel. Het verschil tussen de stromen die deze twee cellen leveren is evenredig met de uitwendige diameter van de buis. De baan waarlangs de buis door de lichtbundel loopt mag zonder bezwaar een weinig fluctueren: als de verplaatsingen maar binnen een „venster" van 4×25 mm blijven, wordt de nauwkeurigheid van de meting er niet door aangetast.

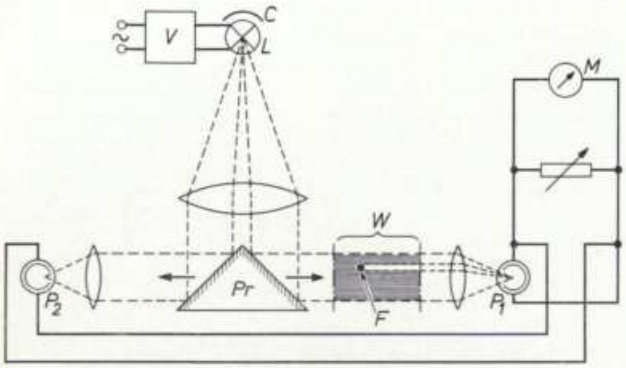


Fig. 3. Optische methode voor continue meting van de diameter van de getrokken buis die uit de oven komt. *F* doorsnede van de buis (de looprichting is loodrecht op het vlak van tekening). *L* lichtbron met condensor *C* en gestabiliseerde voeding *V*. *Pr* prisma dat de lichtbundel verdeelt over de beide fotocellen P_1 en P_2, waarvan de fotostromen in de meter *M* worden vergeleken. De buis *F* onderschept een deel van de bundel die op P_1 valt; zijdelingse verplaatsingen van de buis zijn toelaatbaar mits deze binnen het „venster" *W* van 4×25 mm blijft.

De meetfout bedraagt voor pijpjes van 0,5 mm diameter ± 1%; bij zeer kleine diameters (van de orde van 20 μm) moet nog een onzekerheid van ± 1 μm daarbij worden opgeteld.

Behalve de afwezigheid van mechanisch contact en de grote nauwkeurigheid heeft deze continue meetmethode nog het voordeel van een geringe traagheid; ook is zij ongevoelig voor trillingen en voor licht van de omgeving. De opstelling is bruikbaar zowel voor doorzichtige als voor ondoorzichtige pijpjes, maar de verschillen in buigings- en brekingsverschijnselen die hierbij optreden maken een voorafgaande ijking onder de gebruiksomstandigheden noodzakelijk.

Voor het constant houden van de einddiameter van de buis bij het trekken wordt het foutsignaal dat de meetinrichting afgeeft versterkt en toegevoerd aan een servomotor. Deze is gekoppeld aan een snelheidsregelaar, waarmee de treksnelheid zodanig wordt gevarieerd dat de afwijkingen in de diameter van de buis worden gecorrigeerd. De tijdconstante van deze regelkring is ongeveer 0,7 seconde; een gedeelte van deze vertraging is te wijten aan de looptijd van de buis tussen de trekzone en de meetplaats.

Er is thans nog een andere meetmethode in ontwikkeling, die berust op de diëlektrische verliezen in een trilholte voor microgolven. De buis wordt door een op resonantie afgestemde trilholte gevoerd die in een transmissielijn is opgenomen; de door de buis veroorzaakte aanpassingsfout geeft een zeer nauwkeurige maat voor de hoeveelheid buismateriaal die op ieder ogenblik in de trilholte aanwezig is. Door combinatie van deze methode met de optische kan men de diameter en de dikte van de buis tegelijk doorlopend controleren.

Toepassingsvoorbeelden

Samenvattend kunnen we zeggen dat de fabricagetechniek van pijpenplaatjes bepaalde overeenkomsten vertoont met die van vezeloptieken; de regelmaat in de diameter van de pijpen is hier echter zeer belangrijk, aangezien deze diameter de versterking bepaalt. Daarom zijn er speciale voorzieningen getroffen om de diameter van de buis, de oventemperatuur en de treksnelheid uiterst nauwkeurig in de hand te houden.

We geven tot slot nog enkele toepassingsvoorbeelden van de pijpenplaatjes. Een bijzonder sprekend voorbeeld is een geheel nieuw soort fotomultiplicator, die in een ander artikel in dit nummer is afgebeeld en daar enigszins uitvoerig wordt besproken [3]. Deze fotomultiplicator bestaat eenvoudig uit een fotokatode, een pijpenplaat en een anode; als anode fungeert hier rechtstreeks het open einde van de coaxiale kabel die het signaal verder leidt, met een impedantie van 50 Ω. Met deze opstelling kan een totale elektronenlooptijd van minder dan 0,1 ns worden bereikt, terwijl deze in een normale fotomultiplicator gewoonlijk 15 ns of nog meer bedraagt. De prestaties van deze nieuwe fotomultiplicator openen nieuwe perspectieven voor de meting van de duur van lichtflitsen.

Een ander voorbeeld is in *fig. 4* weergegeven. Het

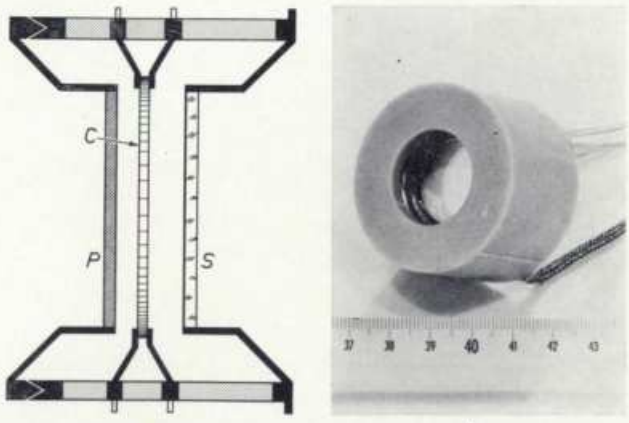


Fig. 4. *a*) Schematische doorsnede van een nieuw soort beeldversterkerbuis. *P* fotokatode. *C* pijpenplaatje. *S* fluorescentiescherm. *b*) De buis met omhulling.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

betreft een beeldversterker, waarbij de fotokatode direct vóór de pijpenplaat is geplaatst. Men krijgt zodoende met een eenvoudige opstelling een zeer grote versterking. De fotokatode van deze buis wordt geactiveerd met behulp van de transfertechniek, die elders in dit nummer wordt beschreven [8].

[8] R. Legoux, De transfertechniek, een nieuwe methode voor de formering van fotokatodes, blz. 238 in dit nummer.

Samenvatting. Na een korte recapitulatie van het principe van de elektronenmultiplicatorpijp worden enkele mogelijke toepassingen van hieruit vervaardigde pijpenplaatjes vermeld. Deze plaatjes, die enkele miljoenen pijpjes kunnen bevatten, moeten bepaalde fysische en elektrische eigenschappen bezitten. De belangrijkste methodes voor de vervaardiging ervan worden beschreven. Het uitgangsmateriaal is meestal een glazen buis met een diameter van enkele mm, die tot de gewenste diameter van de pijpjes wordt uitgetrokken. De pijpjes worden dan gebundeld en samengeperst, waarna door afsnijden van dunne plakken de gewenste pijpenplaatjes worden verkregen. Het trekken kan ook in twee of drie trappen gebeuren. Bij sommige methodes geeft men de buis een metalen of glazen kern, die na het trekken en bundelen door oplossen wordt verwijderd. Om een voldoende regelmatig eindprodukt te krijgen, moet de diameter van de pijpjes (die de te bereiken versterking bepaalt) zeer nauwkeurig in de hand worden gehouden. Hiervoor is een optische meetmethode ontwikkeld waarmee de diameter van een glazen buis of draad tijdens het trekken zeer nauwkeurig (op $\pm 1\%$) en zonder noemenswaardige traagheid kan worden bepaald. Het verkregen foutsignaal van deze meetopstelling beïnvloedt de treksnelheid zodanig dat een constante diameter verkregen wordt.

Directe oscilloscopie van snelle verschijnselen

G. Andrieux en C. Loty

Inleiding

De oscilloscoop is een der machtigste hulpmiddelen waarover de elektronentechniek voor onderzoek en metingen beschikt. Van de oscilloscopie wordt dan ook verwacht dat zij zich even snel ontwikkelt als de elektronica zelf, ja dat zij al klaar staat voor wat in de elektronica nog komen moet. Wat deze eis dubbel zwaar maakt, is dat de oscilloscoop, terwijl hij in prestaties moet kunnen wedijveren met de meest gespecialiseerde elektronische apparaten, toch universeel bruikbaar moet blijven.

De vooruitgang van de elektronica betreft in hoofdzaak de bereikbare snelheid. De vacuümbuizen leverden impulsen met een tijdsduur van een tiental nanoseconden, de halfgeleiders bereiken tegenwoordig een fractie van een nanoseconde, en met de lasers komt nu het gebied van de picoseconden in zicht. Om zulke kortdurende signalen te kunnen weergeven, moet de oscilloscoop een zeer grote bandbreedte hebben. Nu hebben de beste versterkers die heden ten dage gemaakt kunnen worden een stijgtijd van de orde van een nanoseconde. Wil men snellere verschijnselen weergeven, dan zijn er twee mogelijkheden: de directe („real-time") oscilloscopie zonder versterking, en de oscilloscopie volgens het bemonsteringsprincipe. Met deze laatste techniek heeft men opmerkelijke dingen bereikt. Zij heeft echter haar beperkingen; met name blijft men voor verschijnselen welke slechts éénmaal optreden ten enenmale aangewezen op de directe oscilloscopie.

De techniek van de oscilloscopen voor snelle verschijnselen ontwikkelt zich dus in twee richtingen. Met de bemonsteringsoscilloscoop kan men periodieke signalen op het fluorescerende scherm waarnemen, zoals van meet af aan in de oscilloscoop gedaan is. Met de snelle directe oscilloscoop kan men slechts subsidiair periodieke signalen waarnemen, maar hij wordt speciaal geconstrueerd om snelle, éénmalige verschijnselen fotografisch vast te leggen. Deze doelstelling en het ontbreken van een versterker hebben de verdere ontwikkeling van de directe oscilloscoop bepaald.

In een normale oscilloscoop is de katodestraalbuis slechts het middel om de signalen zichtbaar te maken; de eigenschappen van de buis hebben weinig invloed op die van het gehele toestel. Ook de bijbehorende schakelingen, voor de tijdbasis, voor synchronisatie, voor de bundelontblokkering, enz., zijn slechts van

G. Andrieux, ingénieur E.R.B. en E.S.E., Lic. ès Sci., en C. Loty, ingénieur C.N.A.M., medewerkers van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

secundair belang. Het eigenlijke meetelement wordt gevormd door de signaalversterker. (Dat deze uitspraak geenszins overdreven is, merkt men duidelijk wanneer men een specificatie moet opstellen voor de aanschaf van een moderne oscilloscoop met verwisselbare schuifladen.) In een snelle directe oscilloscoop daarentegen is de katodestraalbuis het essentiële onderdeel, waarvan de eigenschappen bepalend zijn voor die van het toestel. Tevens krijgen ook de bijbehorende schakelingen, die wegens de snelheid van de te verwerken signalen aan zeer moeilijke eisen moeten voldoen, een veel grotere betekenis. Dit geldt met name voor de vertragingslijn — een element dat in een normale oscilloscoop niet voorkomt, maar waarvan nu de eigenschappen terdege van invloed zijn bij het ontwerpen van de tijdbasisschakeling en van de katodestraalbuis zelf.

Ontwikkeling van de katodestraalbuis [1]

Zoals reeds gezegd, worden de essentiële eigenschappen van een directe oscilloscoop bepaald door die van de katodestraalbuis. We moeten ons dus eerst rekenschap ervan geven om welke eigenschappen het gaat, en we zullen dan naar mogelijkheden moeten zoeken om deze niet afzonderlijk, maar alle tegelijk te verbeteren. Er zal nl. blijken dat de verschillende eigenschappen van de buis niet onafhankelijk zijn en dat men hier, evenals elders, een kwaliteitsfactor moet invoeren. De vier belangrijkste eigenschappen zijn de bandbreedte, de gevoeligheid, het nuttig gebruikte schermoppervlak en de maximale schrijfsnelheid. De eerste drie betreffen de signaalverwerking in de buis. De vierde, die bepaalt in hoeverre een snel, eenmaal optredend signaal kan worden opgetekend, hangt alleen af van de energiedichtheid in de elektronenbundel.

De bandbreedte is uiterst belangrijk, omdat het immers begonnen is om zeer snel verlopende verschijnselen. De responsiesnelheid bij ontvangst van een signaal is principieel begrensd door de looptijd van de elektronen tussen de deflexieplaten. Men kan deze looptijd verminderen door de lengte van de platen te verkleinen, maar uiteraard vermindert men dan tevens de gevoeligheid. Hetzelfde is het geval als men de snelheid van de elektronen vergroot door de spanning te verhogen. Men zou er ten slotte over kunnen denken tegelijk met het verkleinen van de lengte ook de afstand tussen de platen kleiner te maken. De gevoeligheid blijft dan dezelfde, maar men verkleint de ruimte die de bundel moet passeren, wat een vermindering van de bundelstroom noodzakelijk maakt. Hierdoor neemt de maximale schrijfsnelheid af. We zien hier reeds dat er een kwaliteitsfactor moet bestaan, waarin in eerste instantie de bandbreedte, de gevoeligheid en de schrijfsnelheid voorkomen.

Een voor de hand liggende oplossing van het probleem van de bandbreedte bestaat hierin dat men het afbuigplatenpaar verdeelt in een reeks kleine plaatjes. In ieder paar is dan de looptijd der elektronen zeer kort, en men kan nu de plaatjes zodanig in een transmissielijn opnemen dat de voortplantingssnelheid van de hierin lopende golf gelijk is aan de snelheid van de elektronen in de bundel. De afbuighoeken van de verschillende plaatjes worden dan gesommeerd, waardoor de gevoeligheid weer normaal is. Op dit idee berusten alle lopendegolfbuizen, en het principe wordt ook reeds toegepast in sommige geavanceerde oscilloscopen van het klassieke type: deze hebben katodestraalbuizen met onderverdeelde platen, die uitwendig zijn verbonden door zelfinducties, zodat een transmissielijn met discrete elementen wordt gevormd. Een stap verder in deze richting doet men als men de zelfinducties binnen de buis onderbrengt en ze reduceert tot eenvoudige lussen (*fig. 1a*).

De vertragingslijn die op deze manier ontstaat is feitelijk een filter (met constante K), dat een bepaalde afsnijfrequentie heeft. In een dergelijk filter treedt fazedispersie op, en deze begrenst de stijgtijd lang voordat deze de waarde heeft bereikt die correspondeert met de afsnijfrequentie. Men kan aantonen dat de kortste stijgtijd die ten gevolge van de fazedispersie kan optreden altijd langer is dan de looptijd per element. Om de bandbreedte aanmerkelijk op te voeren, is het dus nodig de deflexieleiding te verdelen in een zeer groot aantal zeer kleine elementen. De capaciteiten en zelfinducties zijn dan ten slotte min of meer continu verdeeld en er ontstaat eenvoudig een zigzagleiding (fig. 1*b*). In de

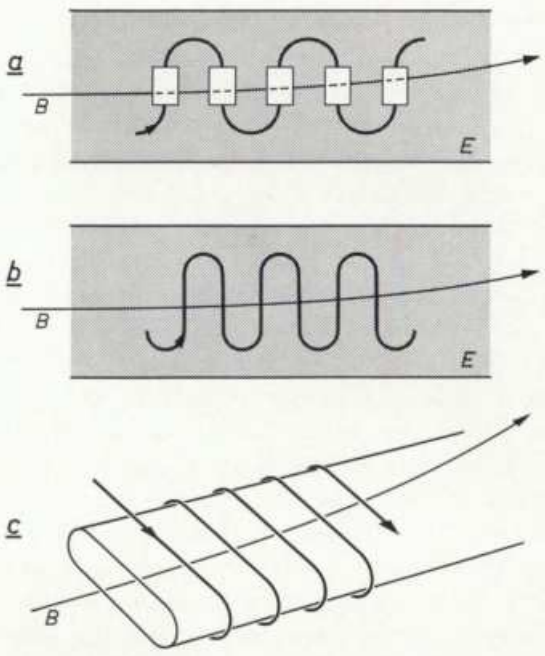


Fig. 1. *a*) Deflexieleiding voor een brede frequentieband. De zelfinducties die de deflexieplaatjes verbinden bestaan slechts uit eenvoudige lussen. De tegenovergelegen plaatjes van de paren zijn tot een lange geaarde plaat E verenigd. B is de elektronenbundel. *b*) Zigzagleiding. *c*) Schroefvormige leiding.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

praktijk komt men met zulk een leiding tot ongeveer 1 GHz.

Bij de zigzagleiding zijn de parameters nog niet geheel continu verdeeld: door het telkens wisselen van de voortplantingsrichting zijn naburige lussen vrij sterk met elkaar gekoppeld en dit is weer de oorzaak van een fazedispersie als eerder genoemd. Deze dispersie wordt veel kleiner als men de deflexieleiding tot een schroeflijn (helix) oprolt (fig. 1*c*). Het is hierbij zelfs mogelijk de dispersie verwaarloosbaar klein te maken, en de frequentieband zou dan slechts begrensd worden door de looptijd in één winding. De frequentieband die men op deze manier kan bereiken is inderdaad weer veel groter, maar nu treedt een nieuwe begrenzende factor op: om de fazedispersie voldoend klein te maken, moet men de dwarsafmetingen van de deflexieleiding klein kiezen, en hierdoor vermindert men de ruimte voor het passeren van de bundel en dientengevolge weer de maximale schrijfsnelheid. Bovendien moet men, om de gevoeligheid te vergroten, de deflexieleiding lang maken door deze een groot aantal windingen te geven, maar men krijgt dan bij de hoogste frequenties weer verliezen, die niet te verwaarlozen zijn. Men vindt dus weer, maar nu uit anderen hoofde, een verband tussen de gevoeligheid, de bandbreedte en de maximale schrijfsnelheid. Verder wordt bij het verlengen van de deflexieleiding ter vergroting van de gevoeligheid ook de maximale afbuighoek van de elektronenbundel beperkt, men verkleint dus het nuttige schermoppervlak.

We zien dus dat de vier belangrijkste karakteristieke grootheden zijn gekoppeld door een kwaliteitsfactor, die in het algemeen de beste waarde kan krijgen bij een schroefvormige deflexieleiding. Een nadere analyse leert dat er slechts twee onafhankelijke middelen bestaan om de kwaliteitsfactor te vergroten: kleiner maken van de elektronenstip op het scherm, of verhogen van de buisspanningen. Voor het eerste kan men b.v. de afstand tussen het scherm en de deflexieleiding verkleinen. Men komt dan, terwijl overigens alles onveranderd blijft, tot een beeld waarin alle afmetingen evenredig verkleind zijn, ook de doorsnede van de lichtstip. De gevoeligheid en het nuttige beeldvlak in verhouding tot de diameter van de lichtstip (alleen deze verhouding is immers van belang) blijven dus onveranderd, maar doordat een zelfde lichtstroom dan wordt geproduceerd op een kleiner oppervlak neemt de helderheid en dientengevolge de maximale schrijfsnelheid toe. Verhoogt men de buisspanningen, dan kan men b.v. de lengte van de buis groter maken en daarmee in hoofdzaak het nuttige beeldvlak vergroten. Ondanks de grotere lengten kan men de diameter van de lichtstip en de bundelstroom constant houden, omdat bij hogere spanning de invloed van de ruimtelading kleiner is. Een vergroting van de gevoeligheid echter kan men met dit tweede middel nooit bereiken.

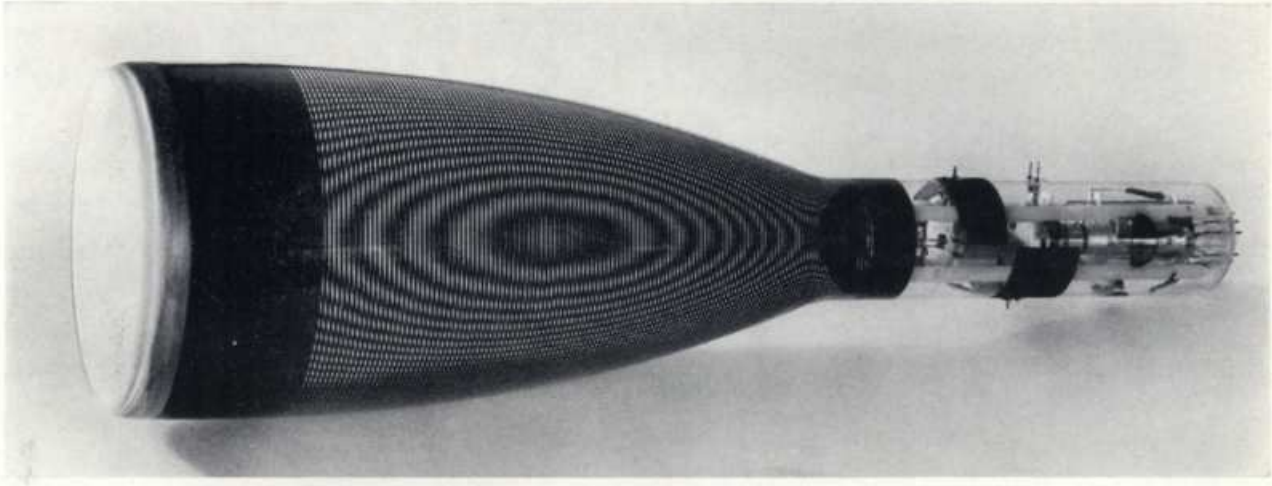


Fig. 2. Katodestraalbuis voor 5 GHz, type 50 D 13 BE, ontwikkeld voor de Direction des Applications Militaires du Commissariat à l'Energie Atomique. Deze buis wordt gebruikt in het prototype van een in dit artikel genoemde oscilloscoop (fig. 6), en ook in een reeks speciale oscilloscopen die door de Société F.E.R.I.S.O.L. voor het Commissariat à l'Energie Atomique zijn vervaardigd. Totale lengte van de buis 48 cm.

Een schroefvormige deflexieleiding als hier besproken is b.v. toegepast in de katodestraalbuizen 42 D 13 BE en 50 D 13 BE. Laatstgenoemde buis is afgebeeld in *fig. 2*, de deflexieleiding van de eerstgenoemde ziet men in *fig. 3*.

Wij hebben hierboven reeds gesproken over de in-

[1] Het beschreven werk is gedaan in opdracht van het Commissariat à l'Energie Atomique, Direction des Applications Militaires. Het is uitvoeriger gepubliceerd in Acta Electronica **10**, no. 4, 1966; dit nummer was geheel aan de snelle oscilloscopie gewijd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vloed van de bijbehorende schakelingen op het algehele ontwerp van de oscilloscoop. Van groot belang is vooral de vertragingslijn, die in de signaalweg moet worden opgenomen tussen het punt waar het signaal voor de synchronisatie wordt afgetakt en de ingangsklem van de buis: deze vertragingslijn compenseert de vertraging die geïntroduceerd wordt door de tijdbasisschakeling. Deze vertragingslijn moet een looptijd hebben

b) een ontblokkeringsschakeling, die een impuls geeft waardoor de elektronenbundel voor de duur van het bruikbare gedeelte van de tijdbasis wordt vrijgegeven;
c) synchronisatie- en startschakelingen, waardoor de tijdbasis en het ontblokkeren van de elektronenbundel nauwkeurig met het signaal worden gesynchroniseerd.

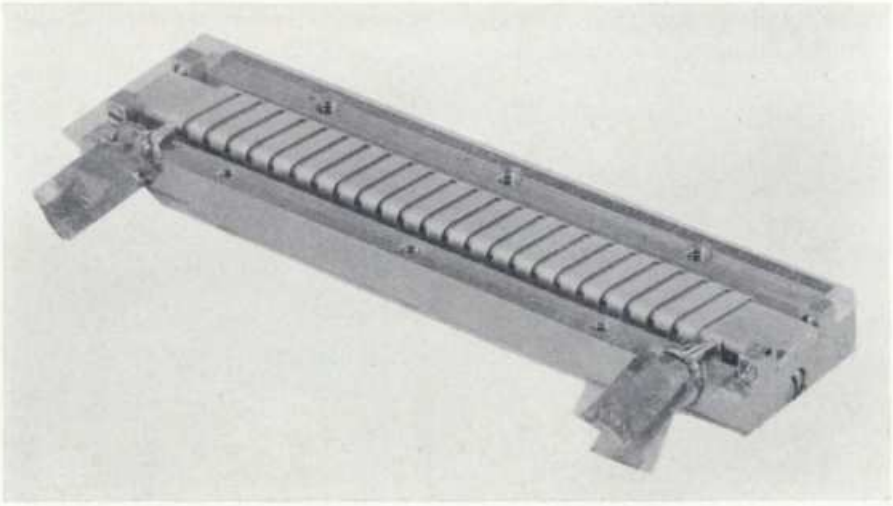


Fig. 3. Deflexieleiding van de katodestraalbuis 42 D 13 BE.

van enkele tientallen nanoseconden, d.w.z. een lengte van enkele meters. Zelfs als men een zeer goede coaxiale kabel gebruikt, zijn de verliezen die hierin bij een bandbreedte van de orde van 5 GHz ontstaan niet verwaarloosbaar. Met het oog op deze verliezen komt men voor de deflexieleiding van de katodestraalbuis tot een bepaalde looptijd per winding, waarbij de impulsresponsie van het apparaat „optimaal" wordt. Zo blijkt dus dat men bij het streven naar optimale prestaties de ontwikkeling van de katodestraalbuis niet kan scheiden van die van de bijbehorende schakelingen.

Problemen van de bijbehorende schakelingen

De belangrijkste schakelingen die bij de katodestraalbuis horen als men een snelle directe oscilloscoop wil maken zijn de volgende.

1) In het signaalkanaal:
a) een startkoppeling, die dient om een tijdinformatie betreffende het binnenkomende signaal aan de synchronisatieschakelingen te leveren;
b) een vertragingslijn, waarvan de bedoeling hierboven reeds werd uiteengezet.
2) Buiten het signaalkanaal:
a) een tijdbasisschakeling, die de spanning voor snelle horizontale afbuiging van de elektronenstraal opwekt;

De startkoppeling moet een fractie van het vermogen van het binnenkomende signaal aftappen, maar zonder dat dit hierdoor wordt vervormd, wat ook zijn snelheid moge zijn. Aan deze voorwaarde kan alleen worden voldaan door een weerstandskoppeling, die vrijwel niet van de frequentie afhangt. Het afgetapte deel van het vermogen moet bovendien klein zijn, zodat geen noemenswaardige reflexie van het signaal optreedt. Een in het LEP gemaakte koppeling toont *fig. 4*.

Wij hebben hierboven reeds vermeld dat de verliezen

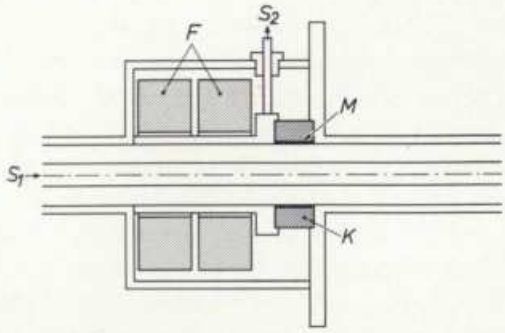


Fig. 4. Constructie van een koppeling voor zeer grote bandbreedte. Bij S_1 wordt het signaal toegevoerd, bij S_2 wordt het synchronisatiesignaal verkregen. *F* ferrietringen. *M* metallisering. *K* keramische isolator. De metallisering heeft een weerstand R_s van 2,5 Ω. De ferrietringen voorkomen dat deze weerstand door de wanden van de koppeltrilholte wordt kortgesloten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de als vertragingslijn toegepaste coaxiale kabel grote invloed hebben op de responsie van de oscilloscoop. Met het oog op het volume van het apparaat is het niet mogelijk deze verliezen verwaarloosbaar klein te maken door de dwarsdoorsnede van de coaxiale kabel te vergroten. Bij een zeer goede kabel wordt de demping in hoofdzaak veroorzaakt door het skineffect; zij is derhalve evenredig met de wortel uit de frequentie. Verder is zij natuurlijk evenredig met de lengte van de kabel. Hieruit volgt dat voor een bepaalde demping de eigen bandbreedte van de kabel omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de lengte. Evenzo vindt men dat ook de invloed van de kabel op de stijgtijd van een impulsvormig signaal evenredig is met het kwadraat van zijn lengte. Uit een en ander blijkt de noodzaak om de vertragingslijn zo kort mogelijk te maken, en derhalve de vertraging bij het starten van de bij de buis behorende schakelingen klein te houden.

waarin „avalanche"-transistors worden gebruikt. Op deze wijze kan men buitengewoon steile fronten met voldoend grote amplitudes verkrijgen. *Fig. 5* geeft een volgens dit principe ingerichte tijdbasisgenerator weer.

Door het genoemde filter wordt de vertraging van het tijdbasissignaal vergroot, en wel des te meer naarmate men kleinere snelheden tracht te bereiken. Nu hebben wij hierboven gezien dat deze vertragingstijd beneden een redelijke waarde moet blijven om de bandbreedte van de oscilloscoop niet te beperken. Men kan derhalve op de beschreven manier alleen *grote* tijdbasissnelheden realiseren. Hierdoor heeft een snelle directe oscilloscoop slechts een beperkt snelheidsgebied, tenzij men extra-schakelingen van conventionele aard voor de kleine tijdbasissnelheden aan het geheel toevoegt.

Grote tijdbasissnelheden maken zeer korte ontblokkeringsimpulsen met zeer steil front nodig. Zo moet

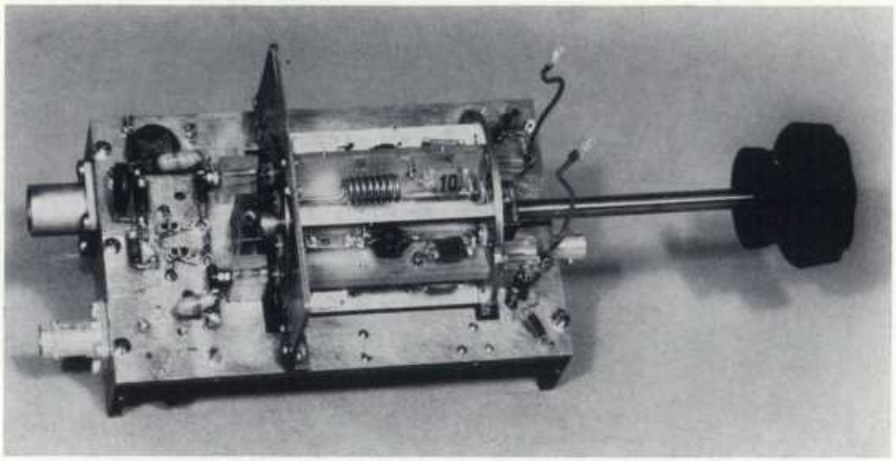


Fig. 5. Tijdbasisgenerator voor de snelle oscilloscoop. De generator is omschakelbaar voor vier snelheden.

De vereiste snelheid van de tijdbasis hangt direct samen met de bandbreedte van de oscilloscoop; voor het correct weergeven van een golffront met een stijgtijd van b.v. 100 picoseconden is voor de tijdbasis een afbuigsnelheid van de orde van 2 cm per nanoseconde nodig. Dit vereist een tijdbasissignaal met een steilheid die tot 150 V per nanoseconde kan bedragen, met een lineair gebied van ongeveer 200 V. Met de gebruikelijke tijdbasisschakelingen kunnen deze waarden niet bereikt worden; men moet hiertoe geheel andere technieken te hulp roepen. Een bij het LEP toegepaste methode bestaat hierin dat men een grote spanningssprong met een zo steil mogelijk front produceert, en vervolgens door middel van een reeks filters dit front zodanig fatsoeneert dat men verschillende afbuigsnelheden kan verkrijgen. De spanningssprong kan men krijgen met behulp van uiterst snelle commutatieschakelingen b.v. de ontblokkeringsimpuls voor een katodestraalbuis die gebruikt wordt in een oscilloscoop voor 5 GHz bij de grootste tijdbasissnelheid een amplitude van ongeveer 150 V hebben en een vlak gedeelte ter lengte van 1,5 nanoseconde, met stijg- en daaltijden van de orde van 0,5 nanoseconde. De wijze waarop een dergelijke impuls aan het stuurrooster van de katodestraalbuis moet worden toegevoerd vereist speciale aandacht. Doorslingeren van de ontblokkeringsimpuls veroorzaakt een ontoelaatbare variatie in de helderheid van de lijn als men in de buurt van de maximale schrijfsnelheid werkt. Verder moet men iedere kans op koppeling tussen de ontblokkeringsschakeling en de tijdbasisschakeling vermijden.

Het zal duidelijk zijn dat het starten door de synchronisatieschakeling met buitengewoon grote nauwkeurigheid moet gebeuren. De toelaatbare fout kan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

men als volgt schatten. De tijdbasissnelheid kan, zoals vermeld, waarden van 2 cm per nanoseconde bereiken. De dikte van de op het scherm van de katodestraalbuis geschreven lijn is altijd zeer klein, b.v. 50 μm. Om van deze geringe lijndikte ten volle te profiteren, mag bij het starten geen grotere fout optreden dan ongeveer 2 picoseconden. Omdat de herhalingsfrequentie van de tijdbasisschakeling beperkt is, moeten bovendien deelschakelingen worden gebruikt als men signalen met een zeer hoge herhalingsfrequentie (enkele gigahertz) wil waarnemen. Door deze verschillende eisen en door de boven besproken noodzaak van een zeer geringe vertragingstijd komt men voor de synchronisatieschakelingen tot een veel ingewikkelder geheel dan in een normale oscilloscoop.

Slot

Wij hebben in het kort de verschillende problemen besproken die zich bij de ontwikkeling van een snelle directe oscilloscoop voordoen, en in het bijzonder de nauwe samenhang tussen deze problemen. Voor hun oplossing is samenwerking in een zelfde team vereist van specialisten op zeer verschillende gebieden, zoals vacuümtechniek, buizen, elektronenoptiek, ultrasnelle impulsschakelingen, en schakelingen voor zeer hoge frequenties. Ook bij de realisatie is een nauwe samen-

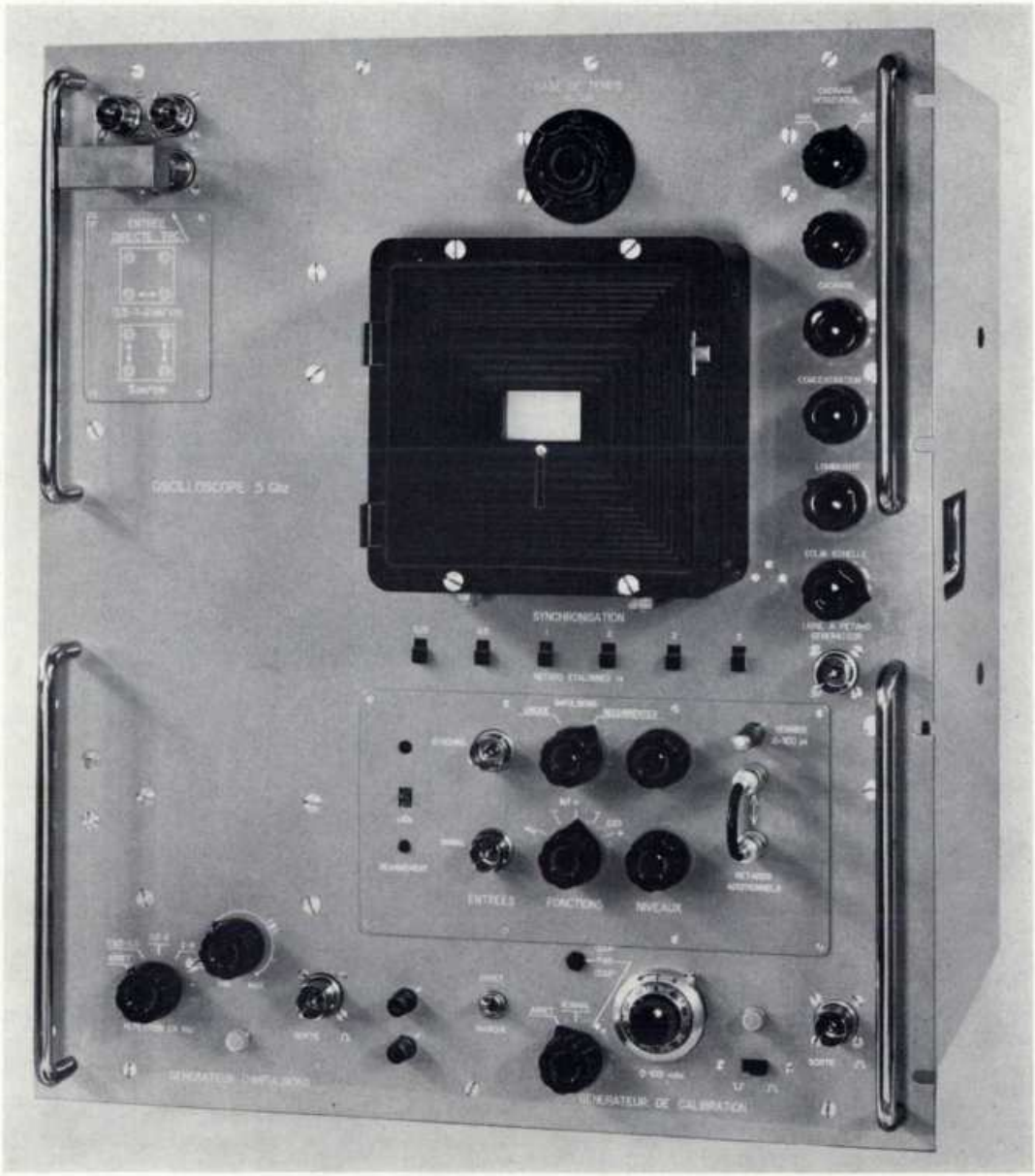


Fig. 6. Experimentele oscilloscoop met een bandbreedte van 5 GHz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

werking wat betreft de technologie op al deze verschillende gebieden noodzakelijk. De gunstige situatie in dit opzicht in het LEP heeft de vervaardiging mogelijk gemaakt van een prototype van een oscilloscoop voor 5 GHz, die reeds veelvuldig in ons eigen laboratorium wordt toegepast. *Fig. 6* geeft een beeld van deze oscilloscoop; in *fig. 7* ziet men een hiermede gemaakte opname van twee impulsen met een tijdsverschil van 25 picoseconden.

Dank zij de vorderingen die de laatste jaren zijn gemaakt zal de directe oscilloscoop het meetinstrument par excellence kunnen worden voor de talrijke snelle en kortdurende verschijnselen die men in verschillende takken van de moderne natuurkunde tegenkomt.

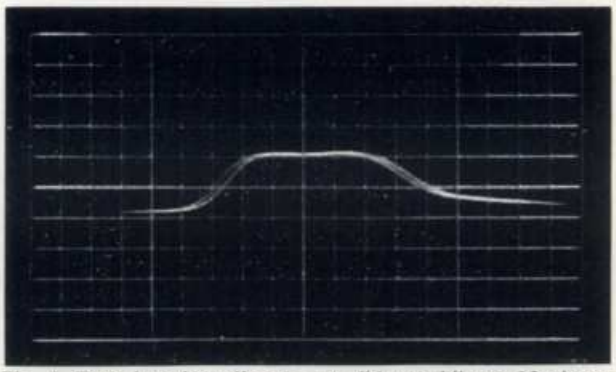


Fig. 7. Twee impulsen die met een tijdsverschil van 25 picoseconden op elkaar volgen, opgenomen op een 5 GHz-oscilloscoop. Stijgtijd van elke impuls 100 picoseconden, amplitude 12 V. De tijdbasissnelheid bedroeg 2 cm/ns. De foto is ongeveer 2× vergroot.

Samenvatting. Aangezien signalen met een tijdsduur van minder dan 1 ns niet meer normaal kunnen worden versterkt, kan men ze alleen zichtbaar maken met een oscilloscoop waarin zij rechtstreeks aan de katodestraalbuis kunnen worden toegevoerd. Hiertoe moet de katodestraalbuis gelijktijdig voldoen aan de voorwaarden van een grote bandbreedte, grote gevoeligheid, grote lijnscherpte en een schrijfsnelheid die groot genoeg is om zeer snelle eenmaal optredende verschijnselen te registreren. De vereiste zeer snelle tijdbasisgenerator en de synchronisatie- en ontblokkeringsschakelingen stellen geheel andere problemen dan bij conventionele snelle oscilloscopen en vereisen geheel nieuwe oplossingen.

Het kweken van monokristallen van cuprochloride

J.-J. Brissot en A. Lemogne

Cuprochloride CuCl vertoont in zijn kubische vorm (zinkblendestructuur) een sterk Pockels-effect. Het materiaal is daardoor belangrijk voor de vervaardiging van elektro-optische modulators voor het golflengtegebied tussen 0,4 en 20,5 μm. Het is echter buitengewoon moeilijk, uitgaande van de smelt, kristallen van bruikbare afmetingen te maken [1], aangezien bij het stolpunt (422 °C) de hexagonale modificatie (wurtzietstructuur) ontstaat, die bij 407 °C, dus in de vaste toestand, overgaat in de gewenste kubische modificatie [2]. Het is om deze reden nodig gebleken de kristallen te kweken bij een temperatuur beneden 407 °C.

Aangezien de kristallen goed transparant moeten zijn, moet er van zo zuiver mogelijk materiaal uitgegaan worden. Het in de handel verkrijgbare, meestal poedervormige CuCl bevat cupri-ionen. Om deze te verwijderen, lost men het poeder op in geconcentreerd zuiver zoutzuur en slaat hieruit CuCl selectief neer door verdunnen met gedeïoniseerd water; CuCl is hierin namelijk veel slechter oplosbaar dan $CuCl_2$. Het verkregen witte neerslag wordt daarna gewassen met aceton en in vacuüm bij kamertemperatuur gedroogd. Vervolgens onderwerpt men het produkt aan een gefractioneerde sublimatie onder een druk van minder dan 10^{-5} torr. Het sublimaat smelt men in een atmosfeer van zuiver argon, en dan heeft men een kleurloze glasachtige massa verkregen, waarvan men de gewenste monokristallen kan kweken.

J.-J. Brissot, ingénieur E.N.S.C.P., Lic. ès Sci., medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk; A. Lemogne, Doct. ès Sci., vroeger medewerker van hetzelfde laboratorium.

[1] F. Sterzer, D. Blattner en S. Miniter, J. Opt. Soc. Amer. **54**, 62, 1964.
[2] M. R. Lorenz en J. S. Prener, Acta cryst. **9**, 538, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ten einde kristallen beneden het smeltpunt te laten groeien, kan men heel geschikt [3] met een zg. flux werken, b.v. volgens de methode van Bridgman. Zo kan men kristallen kweken uit een CuCl-oplossing met een flux-concentratie die juist voldoende is om het smeltpunt tot beneden 407 °C te verlagen. Wij hebben een enigszins afwijkende methode toegepast, waarbij met aanzienlijk lagere temperaturen kan worden gewerkt, zodat minder thermische spanningen in het kristal ontstaan.

Wij gaan uit van het eutectische mengsel van CuCl en KCl (resp. 0,65 en 0,35 mol), waarvan het smeltpunt in de buurt van 130 °C ligt. Onder in een uitgetrokken kwartsbuis wordt een kleine hoeveelheid van dit mengsel gebracht en daarboven een staaf polykristallijn CuCl. De kwartsbuis wordt dichtgesmolten onder een druk van 400 tot 500 torr zuiver argon. Met behulp van een verwarmingsspiraal verhit men het gedeelte waar het eutectische mengsel en het CuCl elkaar raken tot een temperatuur van ongeveer 200 °C: het eutectische mengsel smelt geheel en hierin gaat een weinig CuCl in oplossing. Men laat nu de kwartsbuis in de verwarmingsspiraal zakken met een snelheid van 0,2 mm/h. Deze snelheid is zodanig gekozen dat de flux gemakkelijk in het kristallisatiegebied kan diffunderen terwijl de smeltzone zich door de staaf verplaatst. Aldus groeit er vanuit de punt van de buis een optisch behoorlijk transparant monokristal van CuCl (*fig. 1*). Men kan onderin de buis ook een monokristallijne kiem met een bepaalde kristallografische oriëntatie aanbrengen, waar bovenop dan weer een eutectische pastille en een staaf van polykristallijn CuCl komen.

[3] J. Rivera, L. A. Murray en P. A. Hoss, J. Crystal Growth **1**, 171, 1967; M. Soga, R. Imaizumi, Y. Kondo en T. Okabe, J. Electrochem. Soc. **114**, 388, 1967.

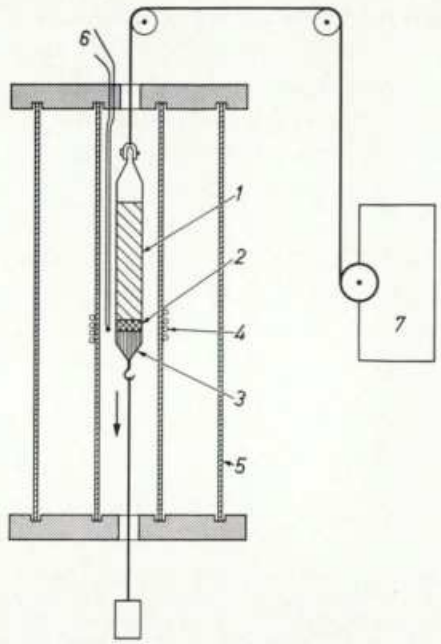


Fig. 1. Toestel voor het kweken van monokristallen van kubisch CuCl. *1* staaf van polykristallijn kubisch CuCl. *2* gesmolten oploszone. *3* groeiend monokristal. *4* verwarmingsspiraal. *5* isolerende wand. *6* thermokoppel. *7* motor.

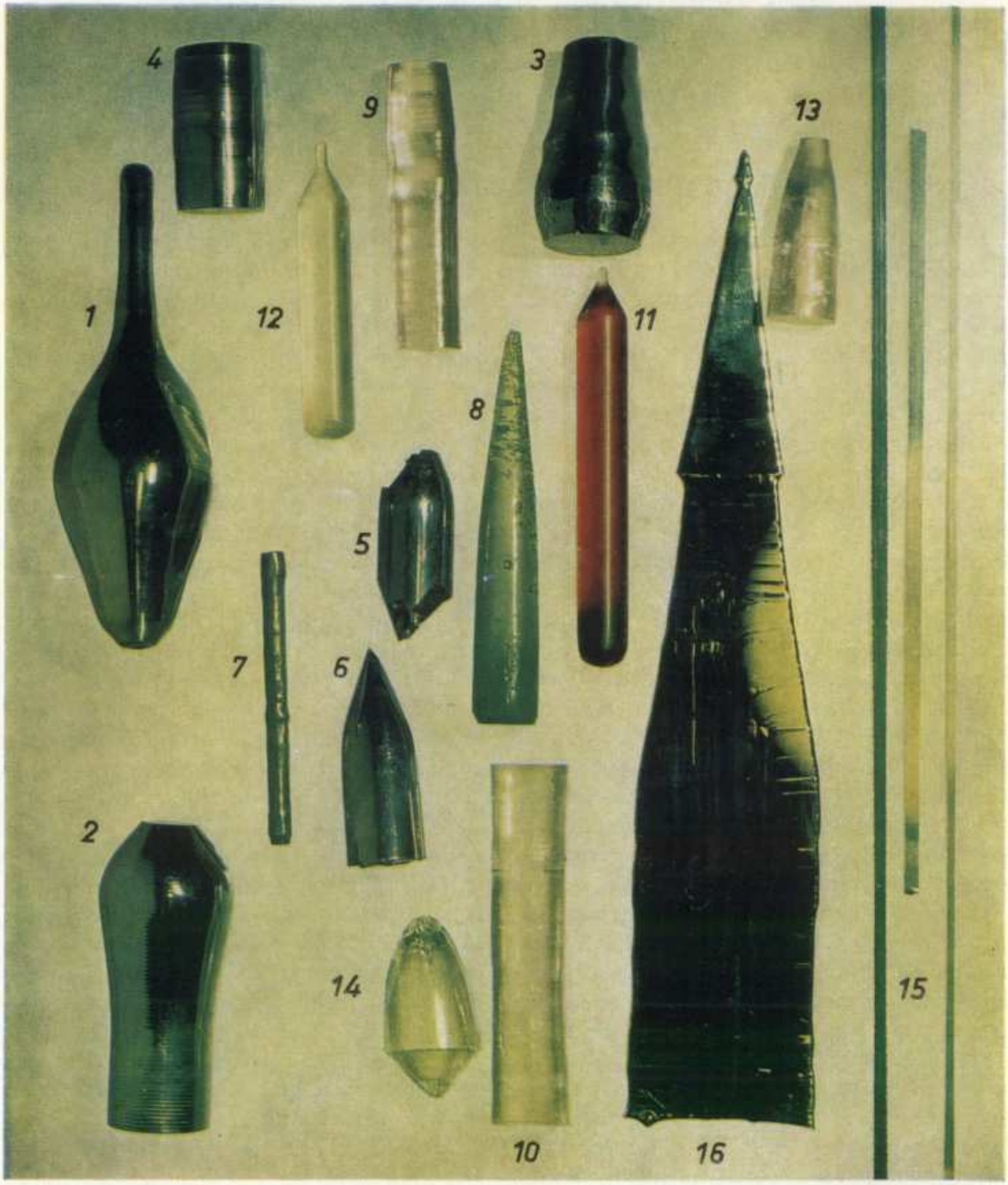
De hier beschreven methode, met een zich verplaatsende gesmolten oploszone, stelt ons in staat bij lage temperatuur en bij geringe temperatuurgradiënten kubische monokristallen van CuCl te kweken met diameters groter dan 10 mm.

Samenvatting. Daar CuCl beneden het smeltpunt van 422 °C een transformatiepunt bezit, kunnen monokristallen van de bij lage temperaturen stabiele kubische vorm alleen bij temperaturen ruim beneden het smeltpunt gekweekt worden. Dit is gelukt door middel van een fluxmethode, met een gesmolten oploszone die zich door een staaf van polykristallijn CuCl verplaatst.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Monokristallen voor halfgeleider-schakelelementen en lasers



In de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée worden onder leiding van J.-J. Brissot allerlei methodes voor de bereiding van monokristallen onderzocht en toegepast: de Czochralski-methode (C), de methode van het kroesloos zonesmelten (Z), de Bridgman-methode (B) en de methode van het zonesmelten in een temperatuurgradiënt (S).

Op de foto zijn een aantal geproduceerde kristallen te zien; het grootste afgebeelde kristal (no. 16) is 18 cm lang.

1: germanium (C)
2: silicium (C)
3: indiumantimonide (C)
4: indiumarsenide (C)
5: cadmiumtelluride (B)
6: kwiktelluride (B)
7: gadolinium (Z)
8: cuprochloride, CuCl (S)
9: calciumwolframaat gedoteerd met neodymium (C)
10: zuiver calciumwolframaat (C)
11: calciumfluoride gedoteerd met uranium (B)
12: zuiver calciumfluoride (B)
13: yttrium-aluminiumgranaat gedoteerd met neodymium (C)
14: zuiver yttrium-aluminiumgranaat (C)
15: drie dendrieten van germanium (gewijzigde methode C)
16: plaatvormig monokristal van germanium (C)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Foto-elektrische vastestof-schakelelementen voor beeldwaarneming in het infrarood

F. Desvignes, J. Revuz en R. Zeida

Inleiding

Er bestaat tegenwoordig wel geen twijfel over dat de beeldwaarneming in dat gedeelte van het infrarode spectrum waarin voorwerpen op normale temperatuur sterk stralen, met name in het gebied van 3 tot 30 micron, van groot praktisch belang is. Hiervoor zijn zowel militaire, deels voor de hand liggende, toepassingen aan te wijzen alsook talrijke toepassingen op wetenschappelijk, medisch en technisch gebied.

Sinds vele jaren wordt dit probleem in het LEP langs verschillende wegen onderzocht. De problemen liggen zo geheel anders dan bij de beeldwaarneming in het ultraviolet, het zichtbare spectrum en zelfs het nabije infrarood (tot 2 μm) dat het ons gewenst lijkt eerst in het kort op de belangrijkste punten te wijzen.

Bij normale temperaturen zendt een lichaam ongeveer 150 W per m^2 en per steradiaal uit (ofwel 10^{22} fotonen per m^2 sr s). Minder dan 2/10000 van dit vermogen — of minder dan 3 fotonen per miljoen — vindt men in het golflengtegebied beneden 3,2 μm; legt men de drempel bij 5,5 μm, dan krijgt men 2% van het vermogen en 0,2% van het aantal fotonen; ligt de drempel bij 12 μm, dan krijgt men resp. 25% en 15%. De genoemde golflengten zijn niet willekeurig gekozen: het zijn de drempelwaarden voor de belangrijke foto-elektrische materialen indiumarsenide (3,2 μm), indiumantimonide (5,5 μm), en germanium gedoteerd met kwik, alsmede cadmiumkwiktelluride (beide 12 μm). Er zij nog aan herinnerd dat de atmosfeer sterke absorptiebanden heeft tussen 2,6 en 2,8 μm, tussen 5,5 en 7 μm, en boven 14 μm.

Een ander belangrijk punt is dat in een vrijwel isotherme ruimte, zoals een gesloten vertrek, de contrasten in het infrarode beeld zeer gering zijn. Het relatieve emissieverschil tussen twee lichamen op verschillende temperatuur is het grootst als dit „zwarte lichamen" zijn, en het hangt dan alleen af van hun temperatuurverschil. Beschouwt men de totale uitgestraalde energie, dan bedraagt het relatieve emissieverschil 1,3% bij een temperatuurverschil van 1 °C. Bedenkt men dat het oog (in het zichtbare gebied) slechts helderheidsverschillen van 1 à 2% kan zien, en voorts dat men voor de meeste toepassingen temperatuurverschillen van b.v. 0,1 °C zal willen waarnemen, dan ziet men dat men hiervoor over instrumenten zal moeten beschikken die een 10 à 20× betere differentiële gevoeligheid bezitten dan het oog. Hierbij komt nog een andere moeilijkheid. Het waar te nemen beeld moet gevormd worden door een optiek waarvan de relatieve opening en de doorlating beperkt zijn, en als men geen speciale maatregelen neemt, loopt het contrastarme door het objectief geleverde beeld kans in de straling van de omgeving te verdrinken. De maatregelen hiertegen bestaan daarin dat men het foto-elektrische lichaam afschermt door lichamen die geen straling uitzenden, d.w.z. die gekoeld zijn en straling absorberen.

De meest voor de hand liggende — en tevens meest ambitieuze — oplossing bestaat daarin te trachten de oplossingen die voor het zichtbare spectrale gebied het beste gebleken zijn naar het infrarood te transponeren, d.w.z. vidicons te maken; met succes bekroonde pogingen in deze richting zijn beschreven in het artikel van Berth en Brissot in dit nummer [1]. Tot nu toe echter hebben deze pogingen slechts geleid tot de vervaardiging van buizen die gevoelig zijn tot 2,5 μm en waarmee alleen lichamen met een temperatuur van minstens 400 °K kunnen worden waargenomen.

Dat bij deze ligging van de foto-elektrische drempel geen televisie van voorwerpen op normale temperatuur mogelijk is, kan men als volgt inzien. Experimenteel en door berekening is aangetoond dat in een normaal televisiesysteem de trefplaat voor een juist waarneembaar signaal 10^{10} foto-elektronen per seconde ofwel 1 nA moet leveren, en voor een redelijk goed beeld, d.w.z. met enkele tientallen onderscheidbare helderheidsniveaus, een stroom van 10^{12} foto-elektronen per seconde ofwel 0,1 μA. Heeft men een quantumrendement gelijk aan 1 en een optiek met een relatieve opening f:2 (zie het artikel van Hily [2]), dan kan men berekenen dat de laatstgenoemde stroom bij een

F. Desvignes, ingénieur E.S.O. en C.N.A.M., en J. Revuz, Lic. ès Sci., medewerkers van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk; F. Desvignes is tevens professor aan de Ecole Supérieure d'Optique. R. Zeida, Doct. ès Sci. Appl., voorheen medewerker van dit laboratorium, is thans verbonden aan de Faculdad de Ciencias, Universidad de Buenos Aires.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

scène op normale temperatuur slechts te verkrijgen is met een drempel boven 3 μm.

Kiest men de drempel bij al te grote golflengte, dan ontstaat weer een moeilijkheid: het signaal wordt dan zo sterk dat het vermogen van de trefplaat om informatie op te slaan verzadigd dreigt te worden (de maximale stroom bedraagt enkele tientallen microampères). Met een drempel bij 5,5 μm levert de straling van een scène op normale temperatuur 500× meer nuttige fotonen dan met een drempel bij 3,0 μm. Om deze overdaad te weren, moet men een gekoeld diafragma met een relatieve opening van *f*:40 gebruiken, of een trefplaat maken waarvan het quantumrendement slechts 2/1000 bedraagt. Dit alles is heel goed te realiseren, maar de bezwaren worden merkbaar als men de zeer zwakke contrasten wil waarnemen die aan temperatuurverschillen van enkele tienden graden in de buurt van 20 °C beantwoorden. Men kan aantonen dat deze moeilijkheden minder ernstig zijn als men met een drempelgolflengte kleiner dan 5,5 μm werkt, aangezien de contrasten dan iets groter zijn.

Met deze situatie als achtergrond hebben wij een nader onderzoek ter hand genomen van de technologie van *P-N*-overgangen, eerst in InSb (drempelwaarde omstreeks 5,5 μm) en daarna in InAs (drempelwaarde omstreeks 3,2 μm). Ons doel was daarbij niet om fotodiodes te realiseren, maar beeldopneembuizen volgens de door Berth ontworpen constructie [1], met een trefplaat bestaande uit een mozaïek van *P-N*-overgangen. Hieronder zal blijken dat de verkregen resultaten wellicht te goed zijn voor de vervaardiging van fotodiodes, maar nog niet toereikend voor de vervaardiging van trefplaten van opneembuizen.

Een geheel andere en al lang bekende mogelijkheid voor de beeldwaarneming in het infrarood berust op het gebruik van een enkele detector, met kleine gevoelige oppervlakte en grote responsiesnelheid, waarover men het tweedimensionale infrarode beeld volgens een bepaalde aftastcode met behulp van optomechanische middelen heen en weer laat kwispelen, zodanig dat dit beeld punt voor punt wordt afgetast. Oplossingen van dit soort, zoals door Jatteau in dit nummer beschreven [3], hebben het grote voordeel dat men alle beeldfouten vermijdt die door plaatselijke gevoeligheidsafwijkingen van de trefplaat zouden kunnen ontstaan, maar hun scheidend vermogen in ruimte en tijd is beperkt wegens de grote snelheid die voor een van de beide mechanische aftastbewegingen noodzakelijk is.

Onze huidige opvatting is dat voor de eerstvolgende jaren een oplossing aangewezen zal zijn die als het ware tussen de beide voorgaande in ligt: hierbij wordt een reeks langs een rechte lijn gerangschikte puntvormige detectors gebruikt (een „strip"; Frans „barrette") en de opstelling behoeft slechts in één mechanische aftastbeweging te voorzien. Deze oplossing biedt de volgende voordelen ten opzichte van de beide voorgaande. De enige vereiste mechanische beweging kan relatief langzaam zijn; in sommige gevallen heeft men niet meer te maken met het probleem van het opslaan van de foto-elektrische informatie in de trefplaat; en de plaatselijke gevoeligheidsafwijkingen kunnen op betrekkelijk eenvoudige manier worden gecompenseerd. De strip van indiumantimonide-fotodiodes van uitstekende kwaliteit die door onze laboratoria is ontwikkeld en vervaardigd vormt, evenals de InAs-InSb-fotodiodes, een bijprodukt van ons onderzoek op het gebied van opneembuizen.

Terwijl men voor opneembuizen met voordeel een foto-elektrische trefplaat kan gebruiken waarvan de drempelgolflengte niet te ver in het infrarood ligt (ongeveer in de buurt van 5 μm), verdient voor de systemen met enkelvoudige detectors juist een detector de voorkeur waarvan de drempelgolflengte verder in het infrarood ligt, aangezien het hier van voordeel is een overvloedig signaal te ontvangen. De ontwerpers hebben nog geen definitieve keuze gedaan tussen detectors die tot 12 μm en die tot 5,5 μm gevoelig zijn; bij een vergelijking tussen deze twee staat tegenover het betrekkelijk geringe voordeel dat de eerste bieden (het kleinste waarneembare temperatuurverschil is hier 3 à 4× zo klein) het nadeel dat de koeling hierbij veel meer eisen stelt en dus kostbaarder is.

In elk geval echter worden de lange golven belangrijker naarmate de temperaturen van de waar te nemen objecten lager zijn.

Eisen waaraan voor de trefplaat van de opneembuis moet worden voldaan

In opneembuizen waarvan de trefplaat gevormd wordt door een mozaïek van *P-N*-overgangen en waarbij de ladingsaccumulatie in deze laatste nuttig wordt gebruikt, moeten de *P-N*-overgangen zeer bepaalde eigenschappen bezitten (zie het aangehaalde artikel [1]). Met name eist men:

a) een zeer zwakke donkerstroom,

b) een zo hoog mogelijke doorslagspanning,

c) een grote capaciteit per oppervlakte-eenheid.

Uit de theorie van de *P-N*-overgangen, die we ook experimenteel hebben getoetst, is duidelijk de belangrijke rol gebleken die bepaalde, elektronische of geo-

[1] M. Berth en J.-J. Brissot, Beeldelektrodes voor opneembuizen ten dienste van infrarood-televisie, blz. 277 in dit nummer.

[2] C. Hily, Lenzenstelsels voor afbeelding in het infrarood, blz. 298 in dit nummer.

[3] M. Jatteau, Een apparatuur voor infrarood-thermografie voor medische toepassingen, blz. 285 in dit nummer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

metrische, parameters spelen als men *P-N*-overgangen wil maken die aan de gestelde eisen voldoen. Ter illustratie het volgende:

1) Men kan de donkerstroom beschouwen als samengesteld uit twee bijdragen: de ene hangt samen met volume-effecten in de halfgeleider, de andere met de eigenschappen van het oppervlak. De stroombijdrage van de volume-effecten zal gering zijn als de minderheidsladingdragers een lange levensduur hebben, als de verarmingslaag dun is en als de concentraties van de doteringen voldoende groot zijn. De oppervlakeffecten zullen minder bijdragen naarmate per oppervlakte-eenheid een geringer aantal ionen en atomen van verontreinigingen, die als recombinatiecentra fungeren, aanwezig is. Bovendien kan het optreden van een sterke donkerstroom ook te wijten zijn aan een onvolmaakte kristalstructuur van de halfgeleider: roosterfouten (dislocaties, kristalgrenzen, vacatures, enz.) geven aanleiding tot plaatselijke doorslagen in de buurt van de *P-N*-overgang.

2) Een hoge doorslagspanning en een grote dikte van de verarmingslaag hangen samen met een geringe concentratie van verontreinigingen in het zwakst gedoteerde gebied. De hier heersende veldsterkte mag nl. voor een gegeven doorslagspanning een bepaalde waarde, die karakteristiek is voor ieder halfgeleidermateriaal, niet overschrijden, en de veldsterkte zal geringer zijn naarmate de genoemde dikte groter is.

3) Grote capaciteiten maken voor een gegeven spanningsverschil een aanzienlijke ladingsaccumulatie mogelijk. De capaciteit van de *P-N*-overgang hangt met de dikte d van de verarmingslaag samen volgens:

$$C \sim d^{-1/n},$$

waarbij n naar gelang het soort overgang (abrupt of geleidelijk concentratieverloop) de waarde 2 of 3 heeft.

4) Voor het hier gestelde probleem is de foto-elektrische gevoeligheid van de *P-N*-overgang van minder belang: als de foto-elektrische drempelgolflengte vrij ver boven 3 μm ligt, kan men met heel geringe waarden genoegen nemen. De detectie-eigenschappen van de *P-N*-overgang spelen dus in eerste instantie geen hoofdrol.

Samenvattend kunnen we zeggen dat de van belang zijnde parameters aan ten dele tegenstrijdige eisen moeten voldoen. In het bijzonder moet de concentratie van de verontreinigingen in de halfgeleider groot genoeg zijn om een grote capaciteit en een geringe donkerstroom te krijgen, maar dit mag geen te nadelige uitwerking hebben voor de doorslagspanning van de *P-N*-overgang en voor de levensduur van de minderheidsladingdragers. De keuze van de genoemde parameters voor III-V-verbindingen is daarbij nog beperkt doordat men op het ogenblik nog niet over voldoend zuivere kristallen kan beschikken (bij indiumantimonide is de minimaal bereikbare concentratie van meerderheidsladingdragers 10^{14}/cm^3, bij indiumarsenide 2×10^{16}/cm^3).

Technologische problemen bij het maken van *P-N*-overgangen in InSb en InAs

In de verschillende stadia van het maken van *P-N*-overgangen in III-V-verbindingen treden talrijke technologische problemen op. Ze doen zich al voor bij het zagen en slijpen. InSb en InAs zijn zeer brosse materialen, zodat speciale mechanische hulpmiddelen moesten worden ontwikkeld om een te sterke verstoring van de kristalstructuur van de halfgeleider te vermijden. Bij de processen van schoonmaken en beitsen, die op de mechanische bewerkingen volgen, zijn zeer speciale voorzorgen noodzakelijk; de chemische baden zijn na talrijke voorproeven gekozen om de beste resultaten te krijgen. Ondanks alle genomen voorzorgen is bij InAs tot slot nog een reiniging van het oppervlak nodig om dit in de toestand te brengen die voor de verdere stappen noodzakelijk is; we hebben hiervoor een methode uitgewerkt waarbij het oppervlak mechanisch wordt gepolijst met chemisch actieve stoffen.

Bij het diffusieproces, waardoor de twee voor de vorming van een *P-N*-overgang nodige gebieden van verschillend geleidingsvermogen worden gemaakt, moeten twee dingen worden vermeden: het wegdiffunderen van het vluchtigste element, en de introductie in het kristalrooster van verontreinigingsatomen op tussenroosterplaatsen.

De grondslagen voor de methodiek zijn theoretisch nog niet geheel opgehelderd, maar na veel geëxperimenteer beheerst men nu de methode om de elementen zink en cadmium uit de dampfaze te laten diffunderen en weet men de omstandigheden zo te kiezen dat *P-N*-overgangen gemaakt van de gediffundeerde kristalplaatjes optimale eigenschappen bezitten.

De ohmse contacten met de *P*- en *N*-gebieden worden gemaakt met behulp van verschillende legeringen; een van de bestanddelen hiervan moet bij voorkeur indium zijn. Er worden speciale maatregelen genomen om het contact met de gediffundeerde laag tot een scherp begrensd gebiedje te beperken. Hiertoe moet de nodige verhitting strikt beperkt worden tot de eigenlijke laszone.

Ter beperking van de doorsnede van de *P-N*-overgang tot de gewenste grootte en ter verwijdering (langs chemische weg) van het grootste gedeelte van de oppervlaktefouten van het kristal in het gebied waar de overgang het vrije oppervlak bereikt, is een etsing vereist. We hebben de hiervoor nodige etsprocessen uitgewerkt; men bereikt daarmee een vrij-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wel volledige verwijdering van het verontreinigde gedeelte.

Daar de *P-N*-overgang in deze toestand uiterst gevoelig is voor zijn omgeving, moet hij onmiddellijk in een gereed gehouden vacuümdicht omhulsel worden geplaatst, dat tevens als kryostaat fungeert. Deze opstelling is aangepast aan de wijze van gebruik van deze detectors, die bij temperaturen ver beneden de omgevingstemperatuur moeten werken. Om de montage van de diode te vergemakkelijken en ook de betrouwbaarheid ervan te verbeteren, is in het LEP een goede methode uitgewerkt voor de passivering van de oppervlakken, speciaal voor de *P-N*-overgangen van InAs.

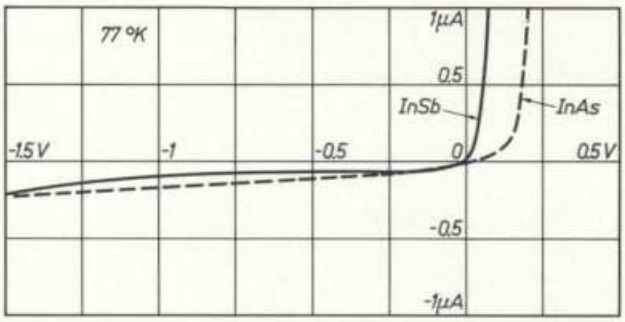


Fig. 1. Stroom-spanningskarakteristiek van een *P-N*-overgang in InSb bij een temperatuur van 77 °K. Gestippeld is de karakteristiek voor InAs bij dezelfde temperatuur weergegeven.

Verkregen eigenschappen

Een belangrijk verschil tussen indiumantimonide en indiumarsenide is, dat *P-N*-overgangen van InAs bij normale temperatuur gebruikt kunnen worden, terwijl *P-N*-overgangen van InSb slechts bij temperaturen beneden —150 °C kunnen werken. De hieronder vermelde resultaten voor InSb gelden derhalve altijd bij koeling tot 77 °K, terwijl die voor InAs zijn verkregen bij de drie temperaturen 300 °K, 196 °K en 77 °K.

Uit de verschillen in het verloop van de stroom-spanningskarakteristieken bij deze drie temperaturen is duidelijk gebleken hoe belangrijk de invloed van het etsen en de passivering van de *P-N*-overgang is, en ze geven ook aanwijzingen over de soort dampen die nog in de kryostaat aanwezig zijn.

De stroom-spanningskarakteristiek van een *P-N*-overgang in InSb is in *fig. 1* weergegeven, drie karakteristieken van een *P-N*-overgang in InAs in *fig. 2*. De maximale keerspanning (doorslagspanning) is in alle vier gevallen van de orde van 4 à 5 V. Voor een gegeven spanningstraject in het keerspanningsgebied van de diodes is de capaciteit omgekeerd evenredig met de derde wortel uit de aangelegde spanning. Representatieve waarden van de capaciteit per oppervlakte-eenheid bij spanning nul zijn 7 nF/cm² voor de InSb-diodes en 12 nF/cm² voor de InAs-diodes.

De foto-elektrische stroom-spanningskarakteristieken bij bestraling door een zwart lichaam op 300 °K, met koeling van de fotodiode tot 77 °K, zijn in *fig. 3* voor InSb en voor InAs weergegeven. De spectrale gevoeligheidskrommen voor de beide gevallen (met

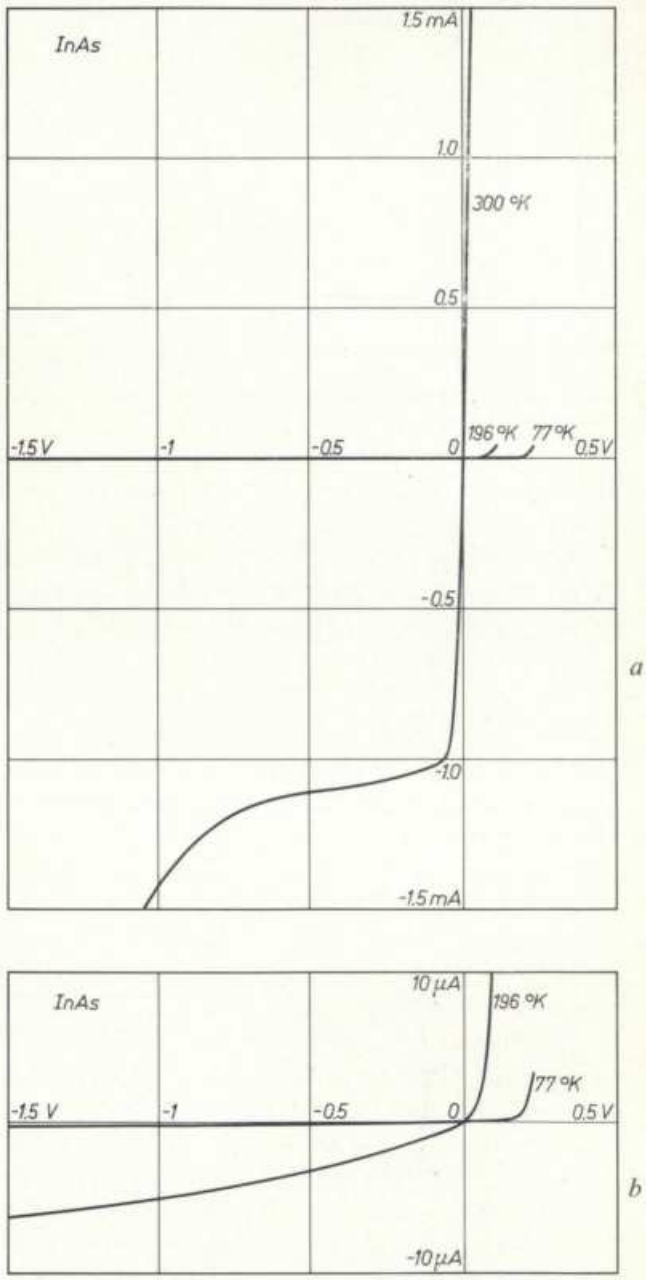


Fig. 2. *a*) Stroom-spanningskarakteristieken van een *P-N*-overgang in InAs bij drie verschillende temperaturen. *b*) De karakteristieken voor 77 °K en 196 °K op veel grotere schaal, vergelijkbaar met die van fig. 1.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

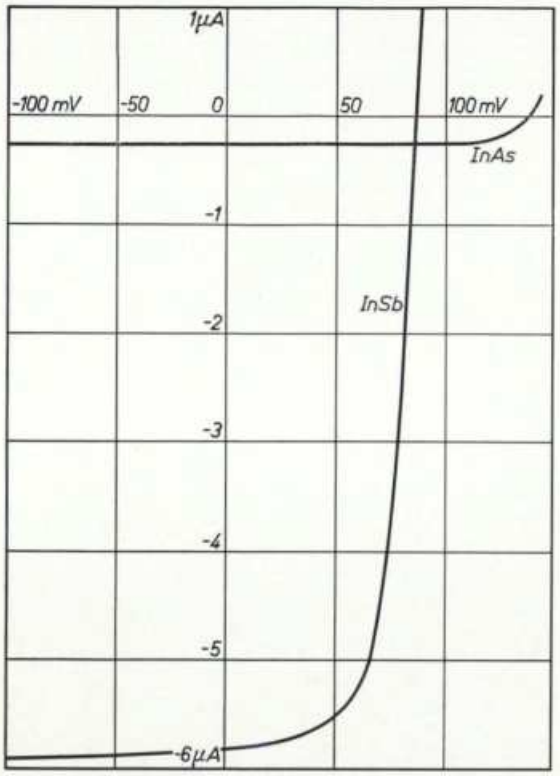


Fig. 3. Foto-elektrische karakteristiek van een *P-N*-overgang in InSb en een *P-N*-overgang in InAs, beide op een temperatuur van 77 °K, bij bestraling door een zwart lichaam op 300 °K (halve openingshoek van de stralenkegel 45°).

InAs op drie verschillende temperaturen) vindt men in *fig. 4*.

De specifieke detectiviteit hebben wij berekend op grond van metingen met de straling van een zwart lichaam op 500 °K die gemoduleerd werd met 500 Hz. De resultaten zijn als volgt:

45×10^8 W^{-1} cm Hz$^{1/2}$ voor InSb (77 °K)
8×10^8 W^{-1} cm Hz$^{1/2}$ voor InAs (300 °K)
50×10^8 W^{-1} cm Hz$^{1/2}$ voor InAs (77 °K).

In *fig. 5* is een doorsnede van de gemonteerde fotodetector weergegeven.

Fotodiode-strippen

Nog enkele opmerkingen over de constructie van de strippen van fotodiodes, die hierboven werden vermeld. Als voorbeeld zij genoemd een strip bestaande uit een reeks van 40 *P-N*-overgangen verdeeld over een lengte van 20 mm (*fig. 6*), waarbij iedere overgang afzonderlijk met een uitwendige keten kan worden verbonden. Het uit glas en metaal bestaande omhulsel bevat een inwendige koelinrichting en een krans van 40 geïsoleerde doorvoeringen, zoals te zien is in *fig. 7*. Iedere afzonderlijke fotodiode heeft een gevoelig oppervlak van 0,4 ×0,4 mm. De gemiddelde stroom-

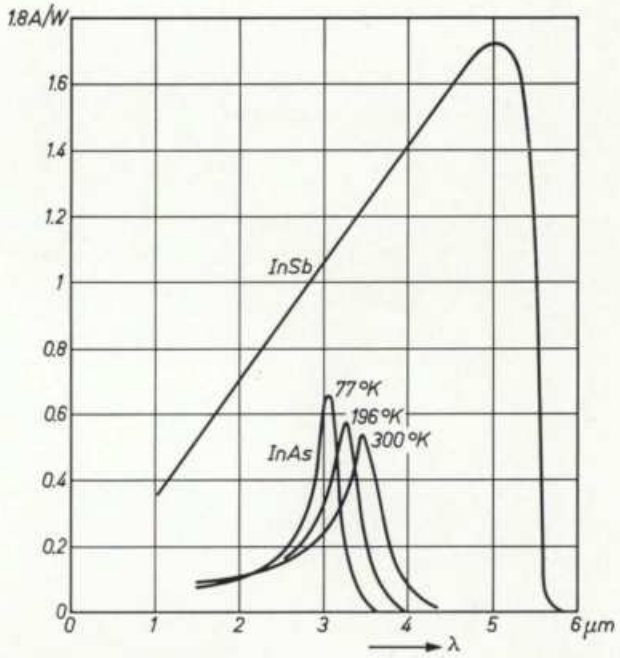


Fig. 4. Spectrale gevoeligheidskromme van een *P-N*-overgang in InSb bij 77 °K en van een overgang in InAs bij 77 °K, 196 °K en 300 °K. Uitgezet is de fotostroom per eenheid van ontvangen vermogen (ampère per watt).

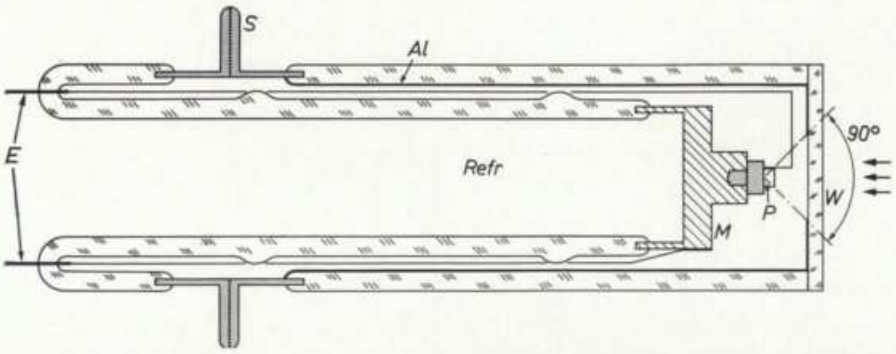


Fig. 5. Een fotodiode *P* van InAs of InSb, gemonteerd in een vacuümdicht omhulsel, dat tevens als kryostaat fungeert. De fotodiode is bevestigd aan een molybdeenhouder *M*, die aan de achterzijde in rechtstreeks contact komt met de koelvloeistof *Refr*. De te detecteren straling bereikt de fotodiode via een venster *W* van korund. *Al* aluminiumlaagje, dat als stralingsscherm fungeert. *S* aansmelting van Dilver P. *E* aansluitpennen van de fotodiode.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

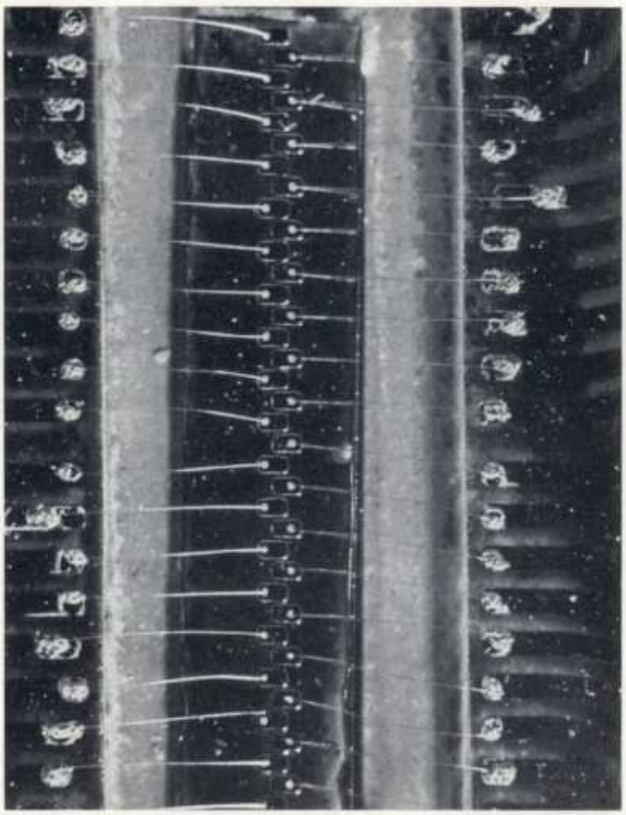


Fig. 6. Strip van 40 door diffusie verkregen fotodiodes. Deze zijn volgens de mesatechniek op een enkel indiumantimonide-kristal aangebracht (een monokristalplaatje van 20 mm lengte). Iedere mesa heeft de afmetingen 400 × 650 μm, bij een hartafstand van 500 μm. De responsie van de verschillende fotodiodes verschilt hoogstens 15% van de gemiddelde waarde.

spanningskarakteristiek bij de normaal aanwezige verlichting is in *fig. 8* weergegeven. *Fig. 9* toont een foto van de uitvoering. Onder het venster ziet men het gekoelde diafragma met een ovale opening, waarachter zich de strip van 40 InSb-fotodiodes bevindt. Langs de omtrek ziet men de aansluitpennen, en links de pijp

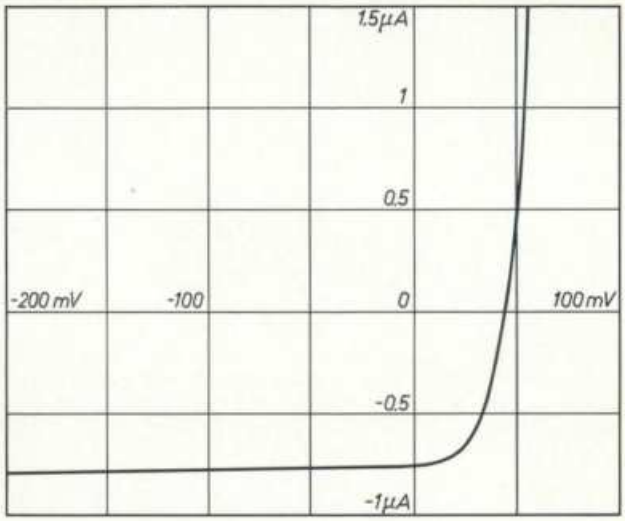


Fig. 8. Foto-elektrische karakteristiek van een van de fotodiodes van de strip, bij een temperatuur van 77 °K en bij bestraling door de omgeving, die zich op 300 °K bevindt.

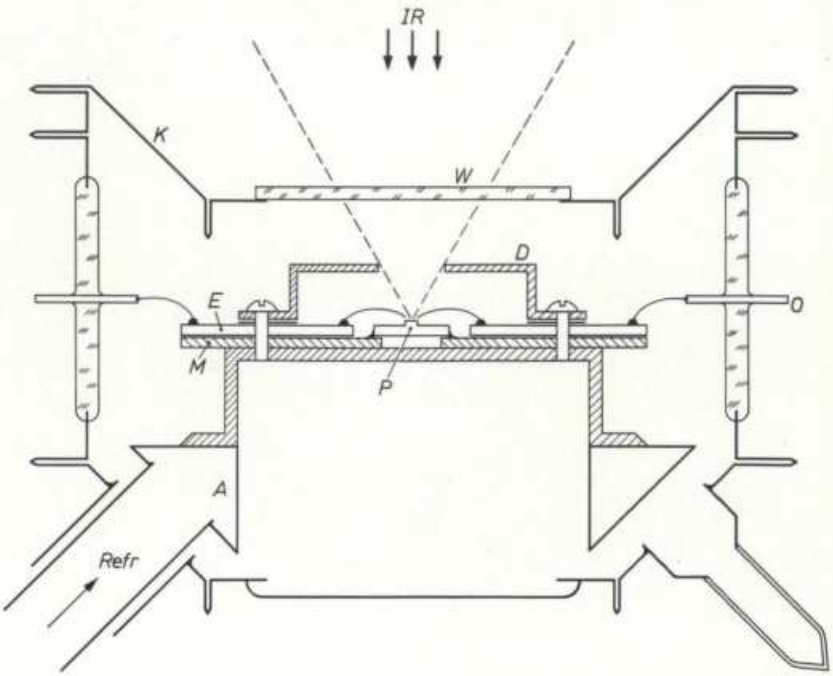


Fig. 7. Doorsnede van een opneembuis met een strip van InSb-fotodiodes. De infrarode straling *IR* valt op de strip *P* via een venster *W* van korund. *M* molybdeenplaat waarop de fotodiode-strip gemonteerd is en die in warmte-contact staat met de door vloeibare stikstof (*Refr*) gekoelde kamer *A*. Het venster wordt gedragen door een kelk *K* van Dilver P. *D* gekoeld diafragma. *E* plaat met de 40 aansluitingen voor de 40 fotodiodes van de strip. *O* een der aansluitpennen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

waarin men een Joule-Kelvin-smoorkraan aanbrengt voor afkoeling tot de temperatuur van vloeibare stikstof, uitgaande van gecomprimeerde stikstof op normale temperatuur.

De kortsluitstroom van de verschillende *P-N*-overgangen bij belichting met de straling van een lichaam op kamertemperatuur vertoont variaties van hoogstens 15% ten opzichte van het gemiddelde.

Fig. 9. Uitvoering van de opneembuis. Men ziet de krans van 40 aansluitingen voor de 40 fotodiodes van de strip. Door het venster heen is het gekoelde diafragma te zien, waarachter zich de strip bevindt.

Samenvatting. Voor de weergave van objecten die optisch afgebeeld worden met zichtbare of ultraviolette straling zijn tegenwoordig opneembuizen beschikbaar, maar er bestaat geen volledig bevredigende inrichting voor het aftasten van beelden gevormd door de thermische straling van objecten die zich op normale temperatuur bevinden. In dit artikel worden de verschillende aspecten van dit probleem en de eisen die eruit voortvloeien besproken. In het LEP is getracht het probleem op te lossen door gebruik te maken van de foto-elektrische eigenschappen van *P-N*-overgangen in monokristallijn indiumantimonide en indiumarsenide. De hiervoor ontwikkelde technieken en de bereikte resultaten worden in het kort behandeld. Iets nader wordt ingegaan op een methode waarbij een strip van een aantal (b.v. 40) InSb-fotodiodes wordt gebruikt. In dit geval is slechts in één richting een mechanische aftastbeweging nodig. Een hierop gebaseerde buis wordt beschreven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Beeldelektrodes voor opneembuizen ten dienste van infrarood-televisie

M. Berth en J.-J. Brissot

Inleiding

Voor televisie in het zichtbare deel van het spectrum zijn de inrichtingen met opto-mechanische aftasting geheel en al verdrongen door opneembuizen die gebruik maken van het accumulatieprincipe. Toepassing hiervan in het infrarood is minder eenvoudig. Om de daar optredende problemen duidelijk te maken, recapituleren wij even het principe en de werking van dit soort buizen. Als voorbeeld nemen wij een buis van het vidicon-type, met fotogeleidende beeldelektrode. De buis is schematisch weergegeven in *fig. 1*. De beeldelektrode bestaat uit een dunne lichtgevoelige laag die aan de voorkant, waarop het licht valt, bedekt is met een transparante, elektrisch goed geleidende laag. Op de achterkant valt een bundel langzame elektronen, die gefocusseerd en afgebogen wordt door elektrische en magnetische velden. Bij het passeren brengt de elektronenbundel deze kant van de beeldelektrode plaatselijk op de katodepotentiaal $-V_b$ (bij potentiaal 0 van de voorkant), en de gevoelige laag, die een dikte d heeft en een diëlektrische constante ε, verzamelt per eenheid van oppervlakte een elektrische lading

$$Q = CV_b = \frac{\varepsilon}{d} V_b .$$

Tussen twee passages van de elektronenbundel vloeit de lading af via de dwarsgeleiding van de laag, waarvan de weerstand per eenheid van oppervlakte

$$R = d/\sigma$$

bedraagt; hierbij is σ het van de verlichtingssterkte afhankelijke geleidingsvermogen van het materiaal.

Voor de werking van de buis is essentieel dat in het donker de lading weglekt met een tijdconstante RC die groot is ten opzichte van de beeldperiode τ. De voorwaarde hiervoor is:

$$\varepsilon/\sigma \gg \tau.$$

Nemen we aan dat de diëlektrische constante van het materiaal gelijk is aan die van vacuüm ($8{,}85\times10^{-12}$ Fm^{-1}) en de beeldperiode $\tau = 4\times10^{-2}$ s (beeldfrequentie 25 Hz), dan volgt dat de waarde van σ kleiner moet zijn dan $2{,}2\times10^{-10}$ $(\Omega m)^{-1}$. Een zo lage waarde

M. Berth, ingénieur C.N.A.M., en J.-J. Brissot, ingénieur E.N.S.C.P., Lic. ès Sci., medewerkers van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

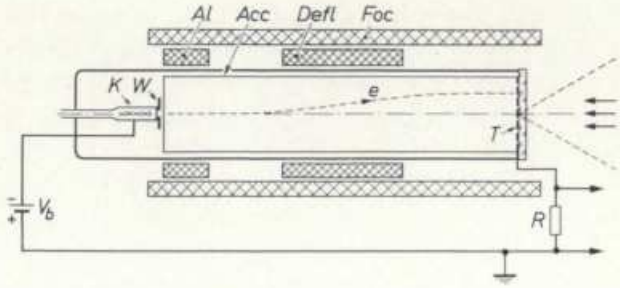


Fig. 1. Schematische voorstelling van een vidicon. T beeldelektrode waarop het optische beeld wordt geprojecteerd. K katode. W Wehnelt-cilinder. e aftast-elektronenbundel. *Acc* versnellingselektrode. *Al* richtspoel. *Defl* deflexiespoel. *Foc* focusseer- en collimeerspoel. De stroom van de signaalplaat van de beeldelektrode vloeit door de weerstand R, de hierop verkregen signaalspanning wordt versterkt en verder verwerkt.

kan slechts bereikt worden met halfgeleiders. Het geleidingsvermogen hiervan hangt af van de effectieve elektronenconcentraties $\bar{N}$ in de toegestane energiebanden, de beweeglijkheid μ van de vrije ladingdragers en de energieafstand ΔE tussen valentie- en geleidingsband, volgens de betrekking:

$$\sigma = q\mu\bar{N} \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

waarin q de lading van het elektron, k de constante van Boltzmann en T de absolute temperatuur is. De parameters μ en $\bar{N}$ verschillen niet veel voor verschillende materialen; voor het verkrijgen van een geleidingsvermogen beneden een bepaalde waarde moet men dus òf ΔE voldoende groot kiezen òf de temperatuur voldoende laag.

Anderzijds bestaat er tussen de grensgolflengte λ_0 van de fotogeleiding en de energieafstand ΔE het verband:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\Delta E},$$

waarin h de constante van Planck is en c de lichtsnelheid. Een ver in het infrarood gelegen grens vereist dus juist een geringe energieafstand ΔE, en voor een voldoend langzame ontlading (tijdconstante RC) wordt aan de temperatuur T van de beeldelektrode een bovenste grens gesteld door:

$$\lambda_0 T \ll \frac{hc}{2k}\left(\ln\frac{q\tau\mu\bar{N}}{\varepsilon}\right)^{-1}.$$

Met gebruikelijke waarden voor μ (10^{-2} $m^2V^{-1}s^{-1}$) en

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$\bar{N}$ (2×10^{25} m^{-3}) levert dit:

$$\lambda_0 T \ll 221 \ \mu\text{m}^\circ\text{K}.$$

Bij de realisatie moet men er nog rekening mee houden dat de aanwezigheid van verontreinigingen altijd tot een verhoging van het geleidingsvermogen leidt, zodat men zelfs bij een nog lagere temperatuur moet werken.

Men kan hieraan ontkomen door toepassing van fijnkristallijne of poedervormige lagen. Hiermee kan men een zeer gering schijnbaar geleidingsvermogen realiseren, maar men krijgt dan te kampen met diverse storende verschijnselen (langere stijgtijden, vermoeidheid en nawerking).

Deze moeilijkheden kan men vermijden door toch gebruik te maken van een macroscopisch homogene fotogeleider, maar dan in de vorm van een mozaïek van *P-N*-overgangen die geformeerd zijn in een monokristallijn materiaal. Het accumulatieproces in de overgangen is in dit laboratorium uitvoerig bestudeerd [1] [2]. We bespreken hier slechts kort waarop het berust.

Voor een *P-N*-overgang in een halfgeleider waarop een spanning in de keerrichting staat, geldt het vervangschema *fig. 2*. De capaciteit C van de condensator hangt van de spanning V af. Bij het passeren van de overgang voert de aftastende elektronenbundel aan deze condensator een lading Q toe, die tussen twee aftastingen afvloeit via de twee stroombronnen i_{ph} en i_p, die respectievelijk het foto-elektrische effect en de parasitaire stromen (thermische emissie, lek langs het oppervlak) voorstellen. Verwaarloost men in eerste benadering de stroombron i_p, dan geeft de stroom door R, die bij een volgende passage van de aftastbundel vloeit en die aan het bijladen van de condensator beantwoordt, een spanningsimpuls waarvan de tijdsintegraal evenredig is met de integraal van de lichtstroom die de overgang tussen twee aftastingen ontvangt.

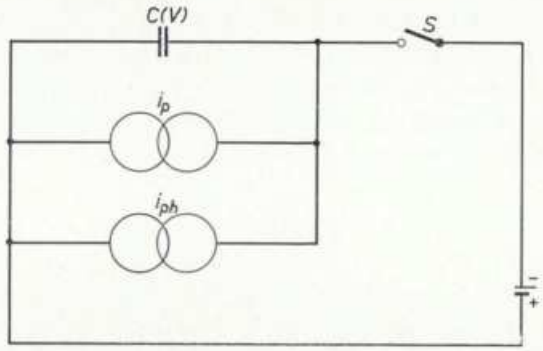


Fig. 2. Vervangschema van een *P-N*-overgang die door een als schakelaar *S* fungerende elektronenbundel wordt geladen.

De capaciteit van de overgang per eenheid van oppervlakte is vrijwel onafhankelijk van de temperatuur en wordt bepaald door de eigenschappen van de ruimtelading die de *N*-laag en de *P*-laag scheidt. Daarentegen varieert i_p sterk met de temperatuur van de overgang en met de energieafstand ΔE van de halfgeleider.

Aangezien de geaccumuleerde lading niet langer dan gedurende een tijd Q/i_p bewaard wordt, bestaat er weer, evenals bij de fotogeleidende laag, een verband tussen de werktemperatuur en de drempelgolflengte. De afleiding, die we hier niet kunnen weergeven, levert de voorwaarde:

$$\lambda_0 T \ll 395 \ \mu\text{m}^\circ\text{K}.$$

Zoals men ziet, is deze voorwaarde minder streng dan die voor de fotogeleidende beeldelektrode: theoretisch kan men nu bij een absolute temperatuur werken die tweemaal zo hoog is.

We bespreken nu achtereenvolgens twee soorten beeldelektrodes die volgens deze beide verschillende principes in het LEP zijn ontwikkeld.

Polykristallijne fotogeleidende beeldelektrode

Puntvormige detectors met een polykristallijne fotogeleidende laag, die werken tussen 77 °K en 300 °K, bestaan reeds enige tijd; de toegepaste verbindingen zijn in hoofdzaak talliumsulfide, de loodsulfides, loodselenide en loodtelluride [3]. De lichtgevoelige elementen bestaan meestal uit zeer dunne, op een isolerende drager aangebrachte lagen waarop zich op enkele millimeters onderlinge afstand twee elektrodes bevinden; bij de werktemperatuur ligt hun impedantie ruwweg tussen 10^4 en 10^8 Ω. Wegens hun relatief lage soortelijke weerstand zijn zulke verbindingen echter veel moeilijker voor lagen met transversale stroomgeleiding te gebruiken, zoals vereist voor beeldelektrodes, waarop men een ladingsbeeld wil aanbrengen. Loodsulfide b.v. heeft een soortelijke weerstand van de orde van 10^4 Ωcm; een beeldelektrode kan men hiermee niet maken, aangezien de tijd gedurende welke de lading geaccumuleerd wordt te kort is vergeleken met de voor opneembuizen gebruikelijke aftastperiodes. Dit bezwaar treedt meer en meer op de achtergrond naarmate het lukt de soortelijke weerstand van de fijnkristallijne fotogeleider te verhogen tot waarden boven 10^{11} Ωcm.

[1] F. Desvignes en M. Robert, Phénomène d'accumulation dans des jonctions *NP* au germanium refroidies, C.R. Acad. Sci. Paris **252**, 2693-2695, 1961.
[2] M. Robert, Les phénomènes d'accumulation dans les photodiodes. Cas particulier du germanium, Acta Electronica **6**, 341-407, 1962.
[3] J.-J. Brissot en A. Dauguet, Les détecteurs actuels de rayonnement infrarouge, Acta Electronica **5**, 459-516, 1961.
[4] Soortgelijke methodes heeft men toegepast voor de „Plumbicon" televisie-opneembuizen met verhoogde roodgevoeligheid.
[5] Aan LEP verleend Frans octrooi no. 1460817, okt. 1965: Procédé de fabrication de couches photosensibles.
[6] G.-A. Boutry, J.-J. Brissot, R. Legoux, J. Périlhou en G. Piétri, Un tube convertisseur d'image pour l'infrarouge moyen „le Serval", Philips Res. Repts. **20**, 684-706, 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Technologie

Men kan de gewenste lichtgevoelige lagen maken door zuurstof in het loodsulfide-rooster te brengen, en wel op twee manieren: men kan uitgaan van loodsulfide en dit oxideren, of van loodoxide en hierin zuurstof vervangen door zwavel [4]. Het laatstgenoemde proces, dat in het LEP is ontwikkeld, is veel handelbaarder en hiermee kan de soortelijke weerstand en het spectrale gevoeligheidsgebied van de fotogeleidende laag in een voldoende breed gebied worden gevarieerd. Er moet echter op gewezen worden dat de verhoging van de soortelijke weerstand, die berust op de aanwezigheid van de zuurstof, ten koste gaat van de gevoeligheid in het langgolvige einde van het spectrum. Men krijgt een goed compromis als men de gevoelige laag tot de temperatuur van vloeibare stikstof afkoelt. Als drager van de laag is een plaatje licht-gedoteerd silicium zeer geschikt; door zijn geleidingsvermogen fungeert het als signaalelektrode van de buis, het transporteert de koude die nodig is voor de koeling van de laag, en het werkt ook als filter voor de korte golflengten, die voor de waarneming in het infrarood doorgaans ongewenst zijn.

De eigenlijke vervaardiging van de lichtgevoelige laag [5][6] gebeurt nu door het siliciumplaatje tot 120 °C te verwarmen en hierop eerst bij een druk van ca. 10^{-2} torr een laag zuiver loodoxide van 12-15 μm dikte aan te brengen. Het geheel wordt vervolgens in een reactievat geplaatst, dat na evacuatie aangesloten wordt op een vat met zeer zuivere, gasvormige zwavelwaterstof. Door instelling van de temperatuur, de H_2S-druk en de tijd gedurende welke de laag aan het gas wordt blootgesteld regelt men de eigenschappen van het gevormde loodoxysulfide zodanig dat de werking van de beeldelektrode, aangebracht in een vidiconbuis, optimaal wordt.

Eigenschappen

De spectrale gevoeligheid van de aldus vervaardigde fotogeleidende laag is weergegeven in *fig. 3*. De gevoeligheidspiek bij 0,9 μm moet waarschijnlijk worden toegeschreven aan een injectie van ladingdragers uit het silicium in de loodoxysulfidelaag.

Met een dergelijke beeldelektrode, afgekoeld tot 77 °K en afgetast met 625 lijnen terwijl de opneembuis

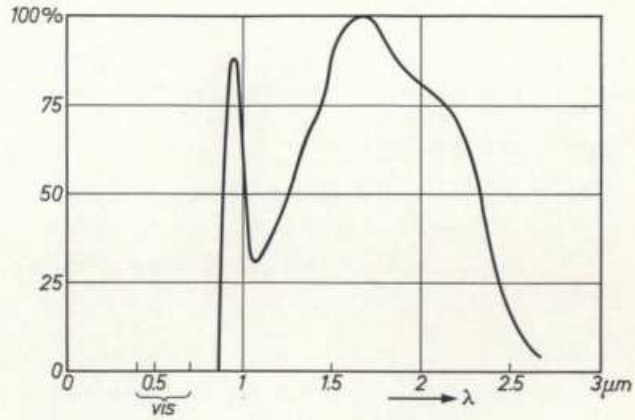


Fig. 3. Relatieve spectrale gevoeligheid van een opneembuis met beeldelektrode van loodoxysulfide („SAPHIR" buis), bij 77 °K. De accolade geeft het zichtbare deel van het spectrum aan.

is uitgerust met een vloeispaatoptiek met relatieve opening *f*:4, kan men voorwerpen onderscheiden die zich op een temperatuur van slechts 130 °C (403 °K) bevinden, en details hierin met slechts 2 °C temperatuurverschil.

Het *minimaal detecteerbare vermogen*, gemeten door de straling van een wolfraamgloeidraad die zich op 2830 °K bevindt geleidelijk met grijsfilters te verzwakken, ligt rond 6×10^{-6} W per cm^2.

Fig. 4 geeft een indruk van de *scherpte* van het infrarood-beeld; de televisiecamera was hier gericht op een met infrarode straling verlichte foto.

Ten gevolge van de microkristallijne structuur van de fotogeleidende laag wordt bij afnemend lichtsignaal een, zij het geringe, tijdconstante merkbaar, en een

Fig. 4. Schermbeeld ter illustratie van de scherpte die te bereiken is met een buis met beeldelektrode van loodoxysulfide. De camera was hier op een met infrarood verlichte foto gericht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zekere nawerking bij de grote helderheden. De nawerking is echter veel minder dan 5% van wat men als restsignaal krijgt na een blokkeerimpuls van 200 ms.

Mozaïek van *P-N*-diodes

De andere in de inleiding genoemde mogelijkheid voor een infrarood-beeldelektrode — het mozaïek van *P-N*-overgangen — zal nu wat uitvoeriger worden besproken.

Technologie

De beeldelektrode wordt hier gevormd door op een dun plaatje germanium van type *N* een mozaïek van *P*-gebiedjes aan te brengen. Kort samengevat kunnen wij bij de fabricage de volgende stappen onderscheiden:

1) Vervaardiging van het germaniumplaatje, dat afgezaagd, geslepen, gepolijst en geëtst moet worden (diameter 25 mm, uiteindelijke dikte 250 μm).
2) Opdampen in vacuüm van een mozaïek van indiumeilandjes op een kant van het plaatje; men krijgt dit patroon met behulp van een metalen masker.
3) Legering van het indium in het germanium in een waterstofoven.
4) Elektrolytisch etsen van de aldus gevormde *P-N*-diodes.
5) Opvullen van de groeven tussen de diodes met een isolator, die moet verhinderen dat de elektronen van de aftastbundel rechtstreeks het *N*-gebied bereiken.

In het zo verkregen mozaïek van fotodiodes hebben deze een hartafstand van 50 μm (zijde van een eilandje 35 μm, tussenruimten 15 μm). Hiermee kan, bij een beeld met formaat 3 : 4, een scheidend vermogen van 300 lijnen met 400 punten per lijn worden bereikt.

De karakteristieken van de diodes in het keerspanningsgebied hebben bij verschillende temperaturen een verloop als in *fig. 5* weergegeven. Men ziet dat bij lagere temperatuur de doorslagspanning minder scherp is en het bruikbare spanningsgebied kleiner wordt. Bij zeer lage temperatuur wordt door dit verschijnsel het toelaatbare potentiaalverschil tussen de beeldelektrode en de katode van de buis beperkt tot enkele volts.

Eigenschappen

De detectie-eigenschappen van een met ladingsaccumulatie werkende fotodiode variëren natuurlijk met de gebruiksomstandigheden (temperatuur, aftastfrequentie, toegepaste optiek). De hierna beschreven metingen zijn uitgevoerd bij een temperatuur van de beeldelektrode van 77 °K (kookpunt van stikstof), een beeldfrequentie van 50 Hz, en met een objectief van vloeispaat met een grootste relatieve opening *f*:4,5.

De genoemde werktemperatuur is alleen voor het gemak gekozen; in feite werkt de buis al goed zodra de temperatuur van de beeldelektrode beneden 170 °K is.

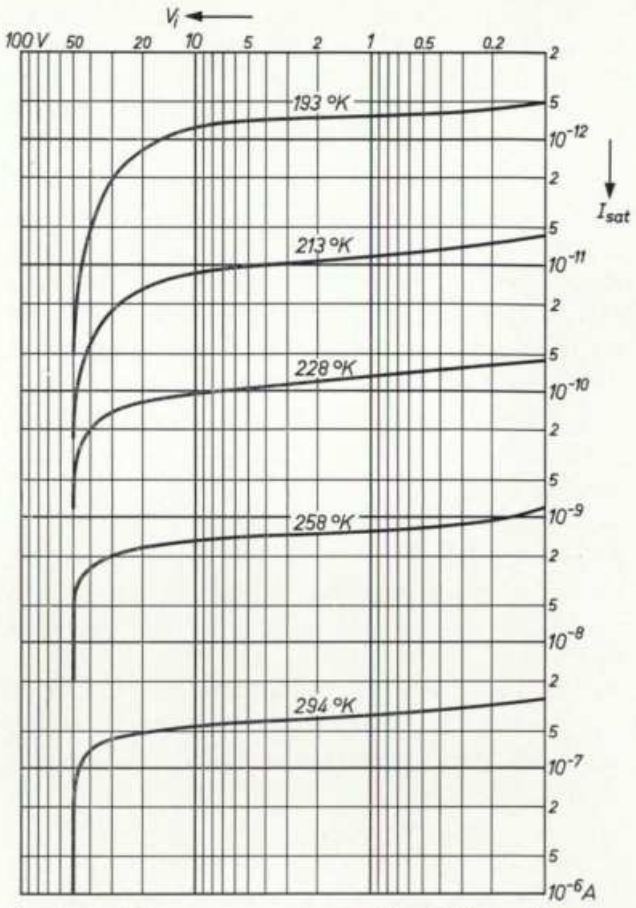


Fig. 5. Statische stroom-spanningskarakteristiek van de germanium-fotodiodes in het keerspanningsgebied, bij verschillende temperaturen. Uitgezet is de verzadigingsstroom I_{sat} als functie van de spanning V_i in de keerrichting.

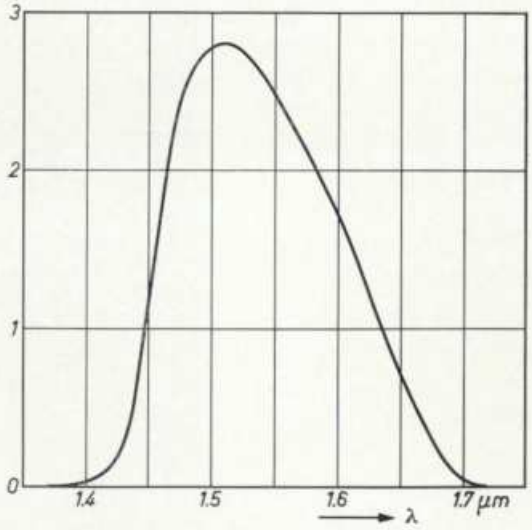


Fig. 6. Spectrale gevoeligheid (in willekeurige eenheden) van het mozaïek van germanium-fotodiodes.

1) Spectrale gevoeligheid

In *fig. 6* ziet men dat met het mozaïek slechts in een vrij smal spectrumgebied rond 1,5 μm beelden verkre-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

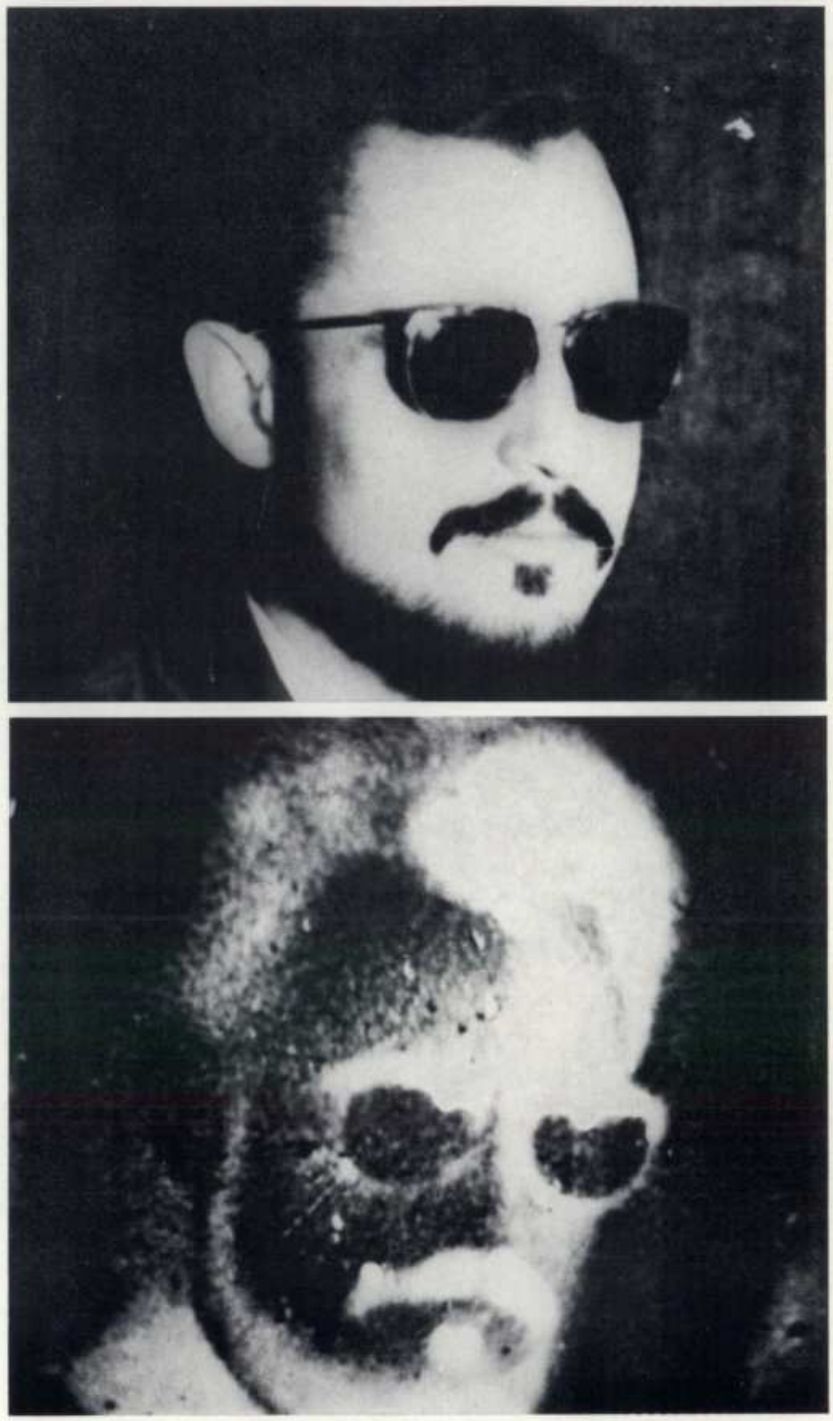
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gen kunnen worden. Het verloop van de spectrale gevoeligheid en de ligging van de grenzen ervan zijn als volgt te begrijpen.

Bij normale temperatuur ligt de foto-elektrische drempelgolflengte van germanium bij 1,9 μm; doordat de energieafstand van het materiaal met dalende temperatuur toeneemt, is deze langgolvige grens bij 77 °K verschoven naar 1,7 μm. Wat het verloop van de gevoeligheidskromme beneden 1,5 μm betreft, dit wordt enerzijds bepaald door de snelle toeneming van de absorptiecoëfficiënt van germanium met de energie van de fotonen, en anderzijds door de korte levensduur van de ladingdragers bij lage temperatuur. De diffusielengte van de gaten is veel kleiner dan de dikte van het germaniumplaatje; voorzover deze dicht bij het voorvlak worden vrijgemaakt — wat bij kortgolvige straling het geval is daar deze door een dunne laag materiaal geheel wordt geabsorbeerd — verdwijnen zij door recombinatie vóórdat zij de *P-N*-overgangen bereiken. De enige ladingdragers die tot het signaal kunnen bijdragen zijn die welke dicht bij de overgangen worden vrijgemaakt, dus door fotonen die diep genoeg in het germanium doordringen.

Indien de op te nemen scène verlicht wordt door een bron met hoge kleurtemperatuur, is dit gebrek aan gevoeligheid voor korte golflengten een nadeel, want de buis gebruikt dan slechts een fractie van de door de bron uitgestraalde energie. Betreft het daarentegen warme objecten die door hun eigen straling kunnen worden waargenomen, dan is het verlies in totale gevoeligheid van geen betekenis zolang het emissiemaximum van het waargenomen object maar bij een golflengte ver boven 1,7 μm ligt ($T \ll 1400$ °C $= 1673$ °K voor een zwarte straler). Overigens is het beschreven gedrag van de beeldelektrode in ieder geval gunstig voor het verkrijgen van een scherp beeld, met een scheidend vermogen dat slechts afhangt van de hartafstand van de mozaïek-eilandjes en van de diameter van de aftaststip. Immers, de waarneming in een smal spectraal gebied vergemakkelijkt het ontwerpen en vervaardigen van achromatische objectieven met grote relatieve opening, en daar de ladingdragers die op grote afstand van de overgangen worden vrijgemaakt deze niet bereiken, kan de zijdelingse diffusie van deze ladingdragers ook geen onscherpte in het beeld veroorzaken.

De sterk selectieve spectrale gevoeligheid wordt geïllustreerd door *fig.* 7. Fig. 7*a* is een normale foto, ge-



a

b

Fig. 7. Een zelfde object, *a*) gefotografeerd met zichtbaar licht op een normale emulsie, *b*) afgebeeld op het scherm bij een televisie-opname met infrarode verlichting.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

maakt met zichtbaar licht; fig. 7*b* is een foto van het beeld dat men op het scherm van de ontvanger krijgt bij „verlichting" van de scène met een infrarood bundellicht. Bij 1,5 μm heeft water (als vloeistof) een sterke absorptieband; de contrasten in het beeld worden derhalve bepaald door de hoeveelheid water die de huid, de beharing en de kleding bevatten.

2) Het minimale detecteerbare vermogen

We hebben het minimale detecteerbare vermogen ook hier bepaald door geleidelijke verzwakking van de straling van een wolfraamdraad op 2830 °K met grijsfilters. Bij deze lichtsoort is een verlichting op de beeldelektrode van 5×10^{-8} W/cm² juist niet meer te onderscheiden van de achtergrond.

3) Laagste detecteerbare temperatuur

De laagste detecteerbare temperatuur hangt van het gebruikte objectief af. Met een relatieve lensopening $f:4{,}5$ kan men een beeld krijgen van een zwart lichaam op 180 °C (453 °K). Deze grens daalt tot 150 °C als men een objectief met een opening $f:1{,}5$ gebruikt. Dit is de grootste relatieve opening die de geometrie van de buis toelaat.

4) Scheidend vermogen

Voor het meten van het scheidend vermogen projecteert men op de beeldelektrode een testbeeld van afwisselend witte en zwarte evenwijdige banden. Het scheidend vermogen hangt af van de onderlinge oriëntatie van aftastrichting, testbeeldbanden en mozaïekgroeven. In het algemeen treden bij zulke regelmatige structuren interferenties op, die moiré-effecten geven. Het scheidend vermogen is dan niet isotroop. Plaatsen we een diagonaal van de vierkante mozaïek-eilandjes evenwijdig met de lijnaftasting, en de banden van het testbeeld loodrecht op deze richting, dan wordt de contrastoverbrengingsfunctie gegeven door *fig. 8*. Houdt men nog rekening met de onvolkomenheden van de gebruikte testbeeldprojector, d.w.z. met zijn eigen contrastoverbrengingsfunctie, dan klopt de kromme goed met de resultaten die men op grond van de berekening kan verwachten.

Constructie van de gebruikte buizen

Het is misschien niet ondienstig ter aanvulling een korte beschrijving te geven van de buis die we in dit laboratorium hebben gemaakt om er de beschreven beeldelektrodes in te gebruiken.

In grote lijnen is de constructie (*fig. 9*) gelijk aan die van een vidicon: men heeft een gloeikatode, een elektronenoptiek waarmee langzame elektronen gefocusseerd en gecollimeerd kunnen worden, en een beeldelektrode die aan een kant met de elektronenbundel wordt afgetast terwijl op de andere kant het infraroodbeeld wordt geprojecteerd. Een niet getekend, buiten de buis aangebracht stel spoelen zorgt voor de focussering en de deflexie. De buis verschilt van het bekende vidicon door enkele constructiedetails, die voortvloeien uit de eisen dat het fotogevoelige oppervlak gekoeld moet kunnen worden en dat het geen infrarode straling van de katode mag ontvangen.

De koelinrichting

De drempelgolflengte van de germanium-beeldelektrode ligt niet zo ver in het infrarood dat men de buiswanden zou moeten koelen. Voor het koelen van de beeldelektrode zelf hebben wij binnen de buis een ringvormige vacuümdichte kamer aangebracht die via een

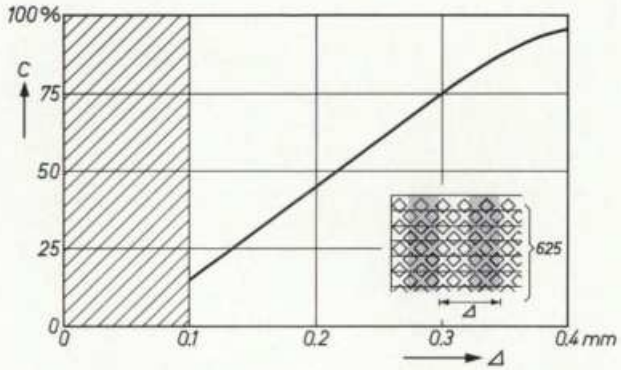


Fig. 8. Scheidend vermogen van het mozaïek van fotodiodes, bij weergave van een testbeeld met zwart-witte banden met hartafstand Δ, bij een onderlinge oriëntatie van mozaïek, testbeeld en aftastrichting als geschetst in de inzet. Uitgezet is het gemeten contrast C tussen de donkere en de lichte banden als functie van Δ. In het gearceerde gebied treden moiré-effecten op.

dubbelwandige pijp in verbinding staat met de buitenwereld (zie fig. 9). Deze pijp is door de kraag die het intreevenster van de opneembuis draagt heen gevoerd. Daar het vacuüm in de opneembuis zelf als thermische isolator fungeert en het metaal van de pijp de warmte slecht geleidt, blijft de warmte-uitwisseling tussen de koelinrichting en de omgeving tot een minimum beperkt. De buiswanden en speciaal het intreevenster blijven dus steeds vrijwel op kamertemperatuur, zodat men bij het inschakelen van de buis geen kans loopt op rijpafzetting op het venster of thermische spanningen in de glas-metaalaansmeltingen.

De gewenste koeling kan worden verkregen hetzij door inspuiting van een koelvloeistof (b.v. vloeibare stikstof of argon), hetzij door ter plaatse de nodige koude op te wekken met een Joule-Kelvin-smoorkraan, die men in de dubbelwandige pijp aanbrengt en waaraan gecomprimeerd gas uit een voorraadfles of een compressor wordt toegevoerd.

Er is slechts ca. 1 W koelvermogen nodig. Dit komt

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

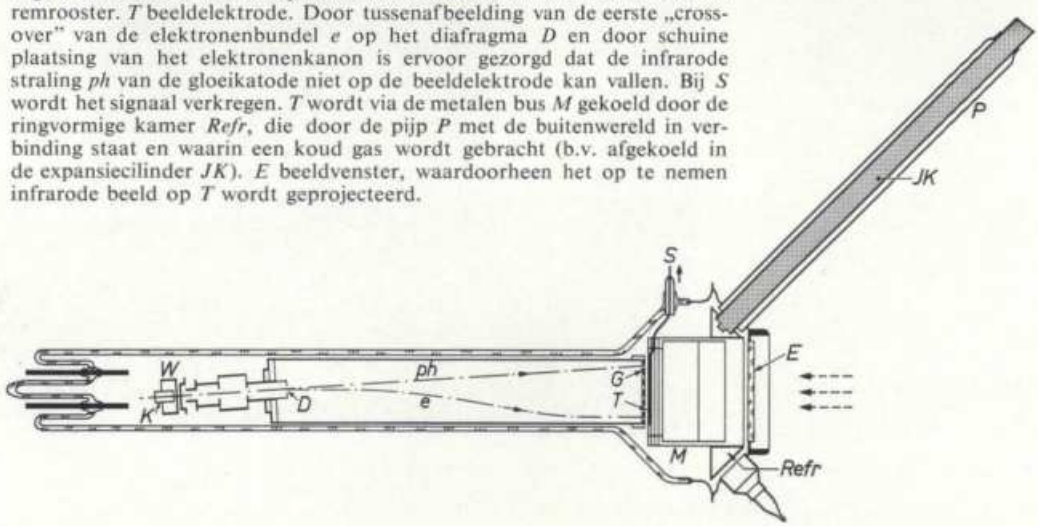
overeen met een verdamping van 30 cm³ vloeibare stikstof per uur.

Het elektronenoptische systeem

De doorgaans in vidicons toegepaste elektronenoptische systemen zijn niet bruikbaar wanneer het spectrale gevoeligheidsgebied van de buis zich uitstrekt tot in het infrarood. In deze systemen kan immers de beeldelektrode de katode „zien"; de door de katode uitgezonden straling veroorzaakt een sluier in het beeld, die ernstiger is naarmate de gevoeligheid groter is. In het geval van een mozaïek van germanium-fotodiodes is de gevoeligheid zo groot dat deze verlichting reeds ver boven het verzadigingsniveau zou liggen.

Dit bezwaar kan men ondervangen door allerlei kunstgrepen. Wij hebben de volgende gekozen. Aan de ingang van de collimatorruimte, op enkele centimeters afstand van de katode, wordt een klein diafragma (0,4 mm diameter) geplaatst. Een elektrostatische lens tussen het triode-stel van het kanon en dit diafragma beeldt hier de „cross-over" af (de eerste bundelvernauwing van de elektronen die de katode verlaten). Zo wordt de openingshoek van de lichtbundel die van de katode uitgaat beperkt zonder vermindering van de elektronenstroom. Plaatsing van het kanon-lens-systeem onder een kleine hoek (ca. 4°) is dan al voldoende om te zorgen dat de lichtbundel buiten het lichtgevoelige oppervlak valt. Wat de elektronenbundel betreft, deze wordt door een constant transversaal magnetisch veld, dat de justeerspoelen leveren, naar de as van de buis teruggebogen en vervolgens door het gebruikelijke axiale magneetveld opnieuw gefocusseerd op het mozaïek.

Fig. 9. Constructie van de opneembuis. *K* katode. *W* Wehnelt-cilinder. *G* remrooster. *T* beeldelektrode. Door tussenafbeelding van de eerste „cross-over" van de elektronenbundel *e* op het diafragma *D* en door schuine plaatsing van het elektronenkanon is ervoor gezorgd dat de infrarode straling *ph* van de gloeikatode niet op de beeldelektrode kan vallen. Bij *S* wordt het signaal verkregen. *T* wordt via de metalen bus *M* gekoeld door de ringvormige kamer *Refr*, die door de pijp *P* met de buitenwereld in verbinding staat en waarin een koud gas wordt gebracht (b.v. afgekoeld in de expansiecilinder *JK*). *E* beeldvenster, waardoorheen het op te nemen infrarode beeld op *T* wordt geprojecteerd.



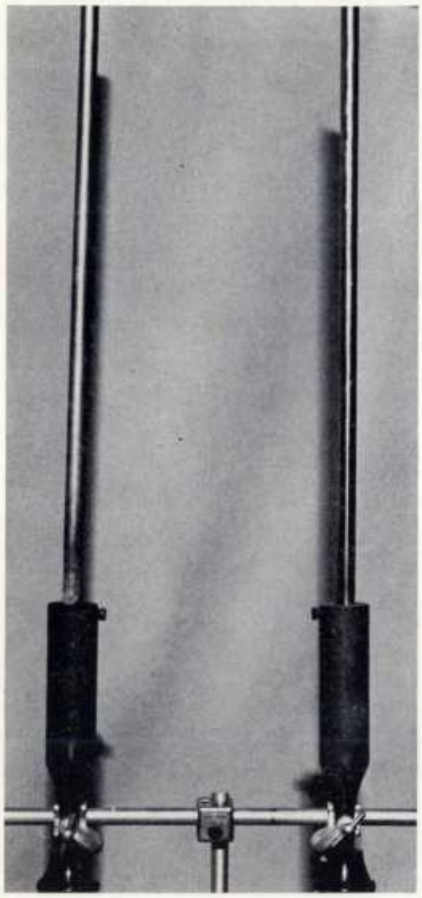
De infrarood-televisiecamera

Bij de infrarood-televisiecamera die in het LEP is ontwikkeld worden de beelden op de beeldelektrode van de opneembuis geprojecteerd met behulp van het reeds genoemde vloeispaatobjectief. Dit is voorzien van een antireflexielaag en laat het gebied van 1,2-2,8 μm door. De brandpuntsafstand van het objectief is 10 mm, de maximale relatieve opening *f*:4. De aftasting vindt plaats met 625 lijnen per beeld en 50 beelden per seconde. In deze camera kunnen beide in het voorgaande beschreven buizen worden gebruikt; de elektronische schakelingen zijn vrijwel geheel gelijk aan die van een lichte reportagecamera die in het LEP voor de Franse radio- en televisie-organisatie (O.R.T.F.) is ontwikkeld. Deze, volledig getransistoriseerde, schakelingen omvatten een door een kwartskristal gestuurde generator die de synchronisatiesignalen levert en verder de aftastschakelingen en alle versterkers en voedingsapparatuur die nodig zijn om een compleet beeldsignaal volgens gebruikelijke televisienormen te leveren. De „videosignalen" kunnen dus rechtstreeks aan een televisie-ontvanger worden toegevoerd voor onmiddellijke waarneming, of eventueel op magneetband worden vastgelegd voor later gebruik. Voor de koeling van de beeldelektrode dient een tweetraps Joule-Kelvin-expansiesysteem [7], gevoed met stikstof- of argongas dat zeer goed gezuiverd moet zijn (een filter hiervoor is in de camera ingebouwd) en een begindruk van minstens 100 bar moet hebben.

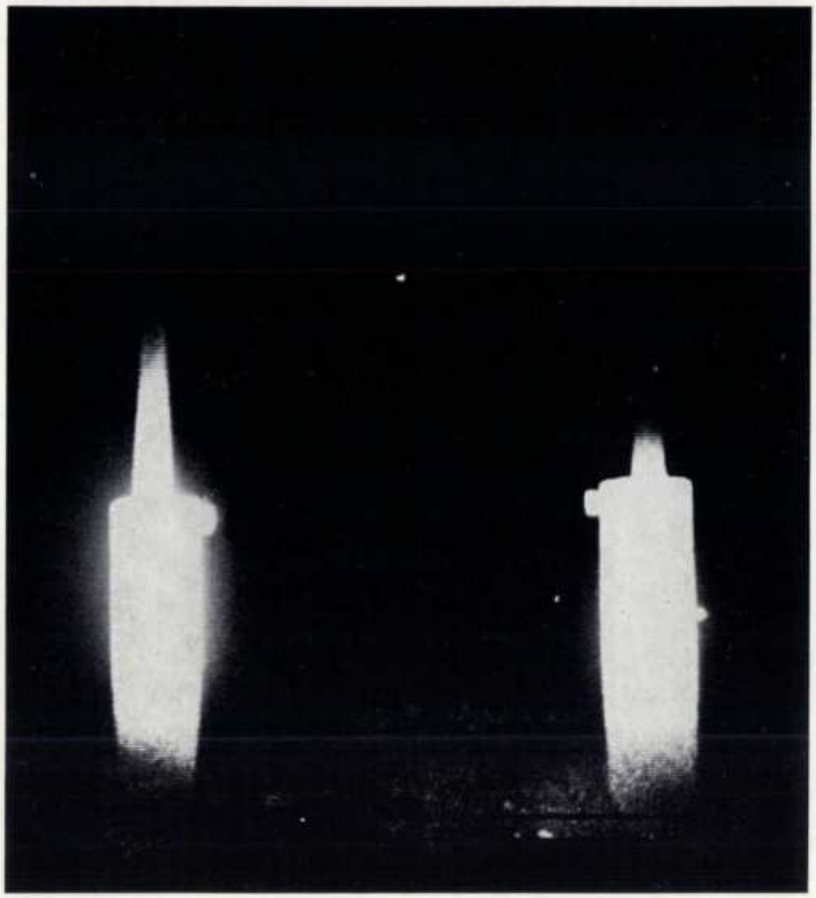
[7] M. C. Lefranc, Le refroidissement des détecteurs de rayonnement infrarouge, Acta Electronica **9**, 47-90, 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a



b

Fig. 10. Proefje ter demonstratie van passieve waarneming in het infrarood.
a) Twee staafjes resp. van koper (links) en van niet-roestend staal (rechts) worden aan de onderkant verhit tot 450 °C.
b) Waar de temperatuur langs een staaf tot ca. 150 °C is gedaald, neemt de luminantie in het televisiebeeld zeer snel af. Men ziet het verschil in warmtegeleidingsvermogen van de beide staven.

Ter illustratie van wat men met passieve waarneming in het infrarood kan doen, diene het in *fig. 10* weergegeven proefje. Twee metalen staafjes van gelijke afmetingen maar van verschillend materiaal (koper en niet-roestend staal, zie fig. 10*a*) werden aan een uiteinde op 450 °C verhit. Het opgenomen infrarood-beeld (fig. 10*b*) demonstreert het verschil in warmtegeleidingsvermogen van de beide materialen. Het gebied waar de luminantie afzakt correspondeert voor elk staafje met een oppervlaktemperatuur van ca. 150 °C. De camera was bij deze proef uitgerust met een opneembuis met de beeldelektrode van loodoxysulfide.

Samenvatting. Verreweg de meeste moderne televisie-opneembuizen voor zichtbaar licht werken volgens het principe van de ladingsaccumulatie. Bij toepassing van dit principe in het infrarood krijgt men wegens de geringe fotonen-energie met moeilijkheden zowel van fundamentele als van technische aard te kampen. Een beknopte analyse van de fysische zijde van het probleem leidt tot een conditie waaraan het produkt van de werktemperatuur van de beeldelektrode en de drempelgolflengte van het materiaal moet voldoen. Deze conditie is nog verschillend naar gelang men het fotogeleidings- dan wel het fotospanningseffect wil toepassen. Het artikel behandelt de vervaardiging en de eigenschappen van twee soorten beeldelektrodes die op grond van deze beschouwingen in het LEP zijn ontwikkeld. De ene berust op fotogeleiding en bestaat uit een macroscopisch homogene microkristallijne laag van loodoxysulfide (drempelgolflengte 2,7 μm); bij de andere wordt het fotospanningseffect gebruikt, deze bestaat uit een mozaïek van *P-N*-overgangen die op een monokristallijn plaatje van germanium zijn gemaakt (drempelgolflengte 1,7 μm).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een apparatuur voor infrarood-thermografie voor medische toepassingen

M. Jatteau

De onderzoekingen over „passieve" infrarood-televisie — oorspronkelijk gericht op militaire toepassingen — hebben geleid tot de ontwikkeling van camera's met opto-mechanische aftasting. Aan de hand van deze apparaten heeft men zich vervolgens rekenschap kunnen geven van de mogelijkheden, maar ook van de problemen van deze techniek voor medische en industriële toepassingen. Zo heeft men met een in het LEP ontwikkelde camera met spiraalvormige aftasting, die in het spectrale gebied van 4 μm werkte [1], interessante beelden van het thermische stralingspatroon van het menselijke lichaam kunnen verkrijgen [2] en een nader onderzoek kunnen wijden aan de wijze waarop men de beschikbare informatie het best nuttig zou kunnen gebruiken. De belangstelling die van medische zijde voor de eerste experimenten op het gebied van de thermografie werd getoond, gaf ons aanleiding de ontwikkeling van een apparatuur ter hand te nemen die beter geschikt zou zijn voor deze speciale toepassing en, daaraan voorafgaande, de experimentele omstandigheden waarmee men te maken zou krijgen nader te bekijken.

Voor dit doel is in het LEP een thermografie-apparatuur gebouwd die de medicus door een combinatie van eigenschappen zeer uitgebreide onderzoekmogelijkheden biedt. Met name bezit de apparatuur een zeer goed thermisch scheidend vermogen, zij is voorzien van een inrichting voor het zichtbaar maken van isothermen (met een nauwkeurigheid van minstens 0,05 °C) en zij kan desgewenst in verschillende golflengtegebieden werken (in de buurt van 10 μm en van 4 μm).

We zullen deze apparatuur hier beschrijven en het een en ander meedelen over experimenten die hiermee in de Radiologische Afdeling van de Hospices Civils te Straatsburg zijn uitgevoerd; deze afdeling is speciaal uitgerust voor het thermografisch onderzoek.

Richtlijnen bij de ontwikkeling van de apparatuur

Welke methode men ook toepast, de infrarood-televisie komt altijd erop neer dat men de thermische straling die afkomstig is van verschillende oppervlakte-elementen van een scène vertaalt in het zichtbare spectrum. Ondanks een zekere analogie met de normale televisie is de situatie totaal verschillend, want het oog kan op geen enkele wijze het verkregen beeld aan de oorspronkelijke scène toetsen. Men kan het infrarood-beeld op twee verschillende manieren nuttig gebruiken. In het ene geval moet het beeld ertoe dienen een thermisch detail van de scène te identificeren, te lokaliseren of eenvoudig te detecteren; hiervoor is het voldoende dat de stralingsenergie die het infrarood-televisieapparaat van het bedoelde detail ontvangt verschilt van de energie die door zijn omgeving wordt uitgestraald. Men kan dan eventueel met *actieve* detectie werken [3]. In het andere geval — en dit is de eigenlijke thermografie — wordt bovendien verlangd dat de luminantieverschillen in het beeld beantwoorden aan de temperatuurverschillen van de oppervlakken. Deze laatste eis gaf een essentiële richtlijn voor onze apparatuur: immers, om aan deze eis te voldoen, moeten wij in de totale straling die van ieder element van de scène wordt ontvangen dat gedeelte kunnen onderscheiden dat *niet* te danken is aan reflexie, maar dat door het element zelf wordt uitgezonden; alleen dit gedeelte hangt direct af van de oppervlaktemperatuur [4]. We moeten dus essentieel met *passieve* detectie werken.

Er moet ook rekening gehouden worden met het verband tussen de stralingsenergie en de temperatuur, d.w.z. met de emissiecoëfficiënt ε_λ van de te onderzoeken oppervlakken, en dit kan een richtlijn geven voor het bij voorkeur te gebruiken golflengtegebied in het infrarood. Bij medische toepassingen is het onderzochte oppervlak de huid, en volgens verschillende auteurs [5][6] gedraagt de gezonde huid zich bij golf-

M. Jatteau, ingénieur C. N. A. M., medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

[1] J. Cornillault, Télévision infrarouge dans le domaine spectral situé au voisinage de 4 microns, Acta Electronica **7**, 319-360, 1963.

[2] J. Cayzac, Problèmes posés par la détection des faibles différences de température en télévision infrarouge, Acta Electronica **9**, 7-18, 1965.

[3] Actieve detectie is daardoor gedefinieerd dat de objecten evenals bij het normale zien worden waargenomen door de straling die zij reflecteren of doorlaten en die afkomstig is van een of meer bronnen die de scène verlichten.

[4] G. Bruhat, Cours de physique générale. Thermodynamique, 5e druk, red. A. Kastler, uitg. Masson, Parijs 1962, blz. 591-677.

[5] R. Elam, D. W. Goodwin en K. Lloyd Williams, Optical properties of the human epidermis, Nature **198**, 1001-1002, 1963.

[6] E. Hendler, J. D. Hardy en D. Murgatroyd, Skin heating and temperature sensation produced by infra-red and microwave irradiation, in: Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. 3, deel 3, red. J. D. Hardy, Reinhold Publ. Co., New York 1963, blz. 211-230.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

lengten boven 6 μm als een grijs lichaam (ε_λ = constant en ongeveer gelijk 1, zie *fig. 1*).

Voor zover ons bekend, werken de toestellen voor directe infrarood-televisie die in de medische wereld tot dusver zijn ingevoerd in het golflengtegebied rond 4 μm (er wordt een stralingsdetector van indiumantimonide gebruikt). Onze opzet was dat ons toestel moest kunnen werken in verschillende golflengtegebieden, ten einde een vergelijking tussen de verschillende verkregen beelden mogelijk te maken.

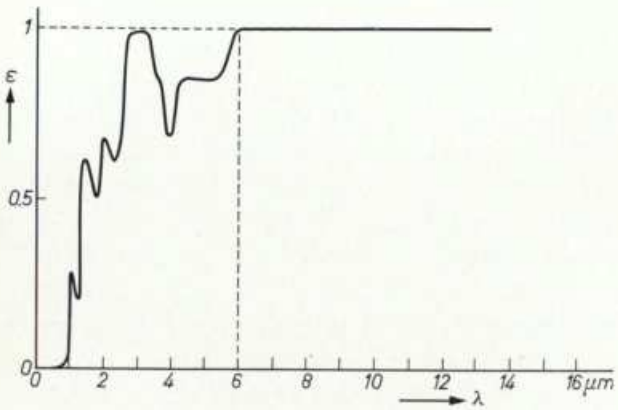


Fig. 1. Verloop van de emissiecoëfficiënt ε van de huid als functie van de golflengte (post-mortem-proef) [5].

De opzet werd ten slotte ook bepaald door de technische doelen die wij ons gesteld hadden: de apparatuur moest enerzijds geschikt zijn om de mogelijkheden van de thermografie voor verschillende klinische toepassingen te peilen, en anderzijds om de eigenschappen nader te kunnen vaststellen die voor de medische waarnemingen vereist zouden zijn.

Om temperatuurverschillen van enkele honderdsten graden in de buurt van kamertemperatuur te kunnen detecteren, moeten de metingen van het uitgestraalde vermogen met een relatieve nauwkeurigheid van minstens 0,1 % worden uitgevoerd. Dit komt erop neer dat men uiterst kleine energieverschillen (van enkele nanowatt) moet kunnen aantonen. Dit brengt de volgende consequenties mee:

a) De detectie moet plaatsvinden in het verre infrarood. Dit volgt uit het gewenste scheidend vermogen in ruimte en tijd, uit de optische beperkingen waaraan men is gebonden en uit de eigenschappen van de thans voor dit golflengtegebied beschikbare stralingsdetectors.

b) Bij voorkeur moeten puntvormige detectors worden gebruikt. Men vermijdt dan de moeilijkheden veroorzaakt door plaatselijke gevoeligheidsverschillen die inherent zijn aan infrarood-trefplaten en aan lijnvormige combinaties van infrarood-detectors.

c) Het scheidend vermogen in ruimte en tijd is onvermijdelijk beperkt door het feit dat bij een gegeven aftastsysteem en een gegeven detector de waarde van het minimale aantoonbare temperatuurverschil nauw samenhangt met het produkt van de beeldherhalingsfrequentie en het aantal onderscheidbare beeldelementen.

d) Bij gebruik van een puntvormige detector moet de scène worden afgetast, en dit moet worden uitgevoerd met opto-mechanische middelen.

e) De mechanische deflexiesystemen moeten bij voorkeur vóór de optische afbeeldingsmiddelen worden geplaatst. Hierdoor vermijdt men een apertuurmodulatie van de infrarode bundelintensiteit, die bij te grote modulatiediepte funest zou kunnen zijn voor de gewenste temperatuuronderscheiding.

De directe weergave van de infraroodbeelden is een zeer belangrijke mogelijkheid, die wij wilden benutten. De weergave gebeurt op het scherm van een katodestraalbuis. Voor dit doel moet de beeldherhalingsfrequentie minstens 1 Hz zijn (voor een lagere frequentie is de tijdconstante van zelfs de langst nalichtende fosforen te beperkt); om de snelle responsie te krijgen die voor deze beeldherhalingsfrequentie nodig is, kan men niet met bolometers of derg. werken, maar moet men quantumdetectors toepassen. Dit is ook nodig met het oog op het ruimtelijk scheidend vermogen dat men voor medische toepassingen wenst en dat minstens 10^4 elementen per beeld bedraagt.

Wegens de wanverhouding tussen het aantal luminantieniveaus dat door een infrarood-camera kan worden onderscheiden en het aantal luminantieniveaus dat op het scherm van een katodestraalbuis kan worden waargenomen [7], is het gewenst het beeld successievelijk voor verschillende temperatuurgebieden op te nemen.

De niet-lineaire amplitudekarakteristiek, bij de omzetting van de infrarode straling in zichtbaar licht, en de selectiviteit van de quantumdetectors maken het nodig de temperatuurmetingen uit te voeren door vergelijking met geijkte stralingsbronnen [8]. Het is een belangrijke eigenschap van de weergave met de katodestraalbuis dat deze vergelijking rechtstreeks op het scherm kan worden uitgevoerd.

De twee laatstgenoemde punten gaven aanleiding tot het ontwikkelen van de isothermenschrijver: een inrichting voor het zichtbaar maken van isothermen, analoog met de hoogtelijnen van een geografische kaart [9].

Beschrijving van de apparatuur

We zullen nu de apparatuur die in het LEP is ontwikkeld wat nader beschrijven, waarbij speciaal op de in het voorgaande genoemde punten zal worden ingegaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De camera

1) Beschikbare quantumdetectors.

De belangrijkste voor het verre infrarood beschikbare quantumdetectors zijn met hun eigenschappen vermeld in *tabel I*. In de derde kolom vindt men de specifieke detectiviteit D^*(500 °K), die de effectieve signaal-ruis(spannings)verhouding aangeeft, die men bij metingen van een zwart lichaam op 500 °K per watt stralend vermogen, per oppervlakte-eenheid van de detector en per bandbreedte van 1 Hz krijgt. De laatste kolom veroorlooft een vergelijking van de verschillende detectors wat betreft hun eigen bijdrage tot het thermisch scheidend vermogen van de camera in de buurt van $T = 300$ °K. De betekenis van de hier vermelde grootheid kan als volgt worden toegelicht. Heeft men twee zwarte lichamen op temperatuur T en $T + \Delta T$, dan is het minimale temperatuurverschil ΔT dat door een camera met opto-mechanische aftasting en met een puntvormige detector kan worden aangetoond evenredig met het produkt

$$\underbrace{\sqrt{\frac{\Delta f}{A}}\,\frac{1}{\Omega\tau_1}}_{\alpha}\;\underbrace{\frac{T}{4\,\tau_2 D_s^* \displaystyle\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\left(\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\lambda}\right)_T \mathrm{d}\lambda}}_{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

De eerste factor (α) karakteriseert de camera: A is het gevoelige oppervlak van de detector, Ω de openingshoek van de combinatie van diafragma en detector, Δf de bandbreedte van de versterker en τ_1 de doorlatingsfactor op de weg die de straling binnen de camera aflegt. De tweede factor (β), waarvan de waarde voor $T = 300$ °K in de tabel wordt gegeven, kenmerkt het spectrale gevoeligheidsgebied. Hierbij is τ_2 de doorlatingsfactor in de ruimte tussen het zwarte lichaam en de camera, D_s^* de „effectieve" specifieke detectiviteit (afgeleid uit D^*(500 °K) door de effectieve spectrale responsie van de detector op de straling van een zwart lichaam op 300 °K in rekening te brengen) en $\mathrm{d}L/\mathrm{d}\lambda$ de monochromatische luminantie van het zwarte lichaam.

Tabel I. Gegevens van de belangrijkste beschikbare detectors. Waar niet anders vermeld, zijn de materialen gebruikt als fotogeleiders. De thermistor is alleen ter vergelijking in de lijst opgenomen; door zijn grote tijdconstante (ongeveer 1 ms) is hij voor de hier bedoelde toepassingen ongeschikt. De aangegeven waarden voor D^* zijn maximale waarden voor een gezichtsveld van meer dan 120°; D^* kan voor sommige detectors worden vergroot door het gezichtsveld met behulp van een gekoeld diafragma te beperken (zie P. W. Kruse, L. D. McGlauchlin en R. B. McQuistan, Elements of infra-red technology; generation, transmission and detection, Wiley, New York 1963).

Detector	Werk-temperatuur	Specifieke detectiviteit D^*(500 °K)	Grenzen van het „effectieve" golflengtegebied		Factor β in uitdrukking (1) voor $T = 300$ °K
			λ_1	λ_2	
	in °K	in m W^{-1} Hz$^{1/2}$	in μm	in μm	in m °K Hz$^{-1/2}$
InSb (fotospanningscel) InSb	77	13×10^7	3,85	5,45	$1{,}48\times10^{-8}$
Ge(Au)	77	3×10^7	5	8,6	$2{,}98\times10^{-8}$
	65	7×10^7	5	8,6	$1{,}27\times10^{-8}$
Cd(Hg)Te	77	3×10^7	8,24	13	$1{,}57\times10^{-8}$
Ge(Hg)	≦ 30	9×10^7	8,1	14	$0{,}6\times10^{-8}$
Ge(Cu)	4,2	9×10^7	7,8	23	$0{,}4\times10^{-8}$
Thermistor	omgevings-temperatuur	$1{,}5\times10^7$	0	∞	$3{,}4\times10^{-8}$

2) Opto-mechanische aftasting.

De aftasting van de scène volgens twee onderling loodrechte richtingen (waarbij men het beeld van de scène over de stilstaande puntvormige detector laat kwispelen) wordt verkregen door middel van een spiegel, die met een periode van 0,5 s een wipbeweging uitvoert, en door een achthoekig prisma met vlakke reflecterende zijkanten, dat met een constante snelheid van 1500 omwentelingen per minuut roteert. De snelle lijnaftasting wordt derhalve door een eenparige roteren-

[7] F. Kerkhof en W. Werner, Televisie, 3e druk, Philips Technische Bibliotheek, Kluwer, Deventer 1969.

[8] G.-A. Boutry en M. Jatteau, Sur la mesure des températures de surface par télévision dans l'infrarouge, C.R. Acad. Sci. Paris **266 B**, 214-217, 1968 (no. 4).

[9] M. Jatteau, Dispositif pour tracer les isothermes dans un appareil d'exploration optique au moyen de rayons infrarouges, Frans octrooi no. 122249, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de beweging verkregen. In *fig. 2* is de opstelling van de camera met detector D, roterend prisma P en de wippende spiegel F schematisch voorgesteld. De betrekkelijk langzame wipbeweging van F wordt teweeggebracht door een nok C; een heel kleine en lichte aandrijving is hiervoor voldoende. Weliswaar was bij deze opstelling een relatief langgerekt prisma voor de lijnaftasting ver-

De lage temperaturen waarop men de infraroodetectors voor medische camera's moet laten werken krijgt men in principe door vloeibaar gemaakte gassen. Voor deze toepassingen zijn nl. de huidige koelsystemen, hoe sterk men deze ook heeft vereenvoudigd, nog te omslachtig (voor een Joule-Kelvin-smoorkraan [11] moet men over een zeer zuiver gas onder hoge druk

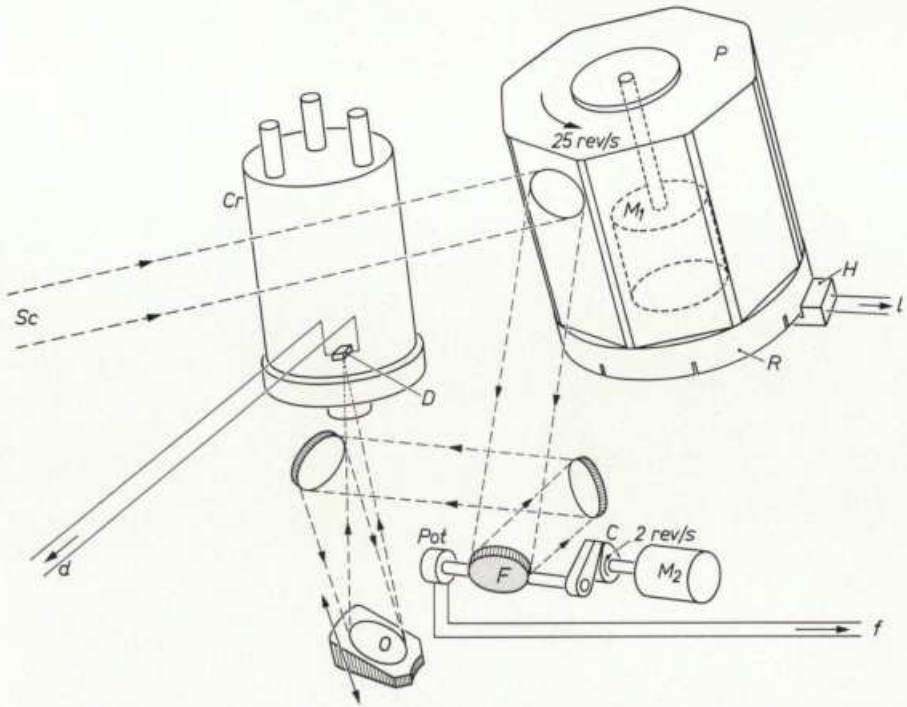


Fig. 2. Schematische voorstelling van het principe van de experimentele LEP-camera voor thermografie. Het prisma P voor de lijnaftasting, dat acht reflecterende vlakken bezit en door de motor M_1 wordt rondgedraaid, en de spiegel F voor de rasteraftasting, waaraan de motor M_2 via de nok C een wipbeweging geeft, doen een beeld van de scène Sc over de detector D kwispelen die in een kryostaat Cr is ondergebracht. De afbeelding van de scène op D wordt teweeggebracht door middel van de parabolische spiegel O. Het in het detectorsignaal d vervatte infraroodbeeld wordt weergegeven op het scherm van een katodestraalbuis, waarvan de tijdbasis wordt gesynchroniseerd door signalen l en f, geleverd door de optische leeskop H met roterende spletenring R en door de potentiometer Pot.

eist, maar dit gaf ons de mogelijkheid de motor binnen het prisma onder te brengen. Gezien de grote afmetingen van het prisma, is de vervaardiging hiervan door frezen met optische kwaliteit [10] een mechanisch kunststukje. De scheve plaatsing van het prisma, die men in fig. 2 ziet, is nodig om ervoor te zorgen dat de verticale hoekafmeting van het afgetaste beeld door het horizontale vlak in twee gelijke delen wordt verdeeld.

Bij de geschetste opstelling staat er bij het aftasten van de scène geen enkel vast of beweeglijk mechanisch gedeelte in de weg, zodat men geen parasitaire modulatie van de ontvangen straling krijgt. De door de schuine plaatsing veroorzaakte aftastvervorming is niet storend.

3) Optisch afbeeldingssysteem.

De keuze van het optische afbeeldingssysteem werd ten dele bepaald door de volgende overwegingen.

beschikken, en kryogeneratoren die volgens de Stirlingcyclus werken [12] zijn niet geheel geruisloos en trillingsvrij, terwijl in beide gevallen ook een zekere mate van onderhoud nodig is). De detector moet derhalve in een kryostaat worden geplaatst. De afmetingen van detectorkryostaten met een voldoende capaciteit om enkele uren zonder onderbreking te kunnen werken zijn in het algemeen te groot om een gecentreerd spiegelsysteem met grote openingsverhouding te kunnen toepassen, tenzij men genoegen kan nemen met aanzienlijke licht-

[10] A. Charles-Georges en A. Salmon, Usinage de cavités de pompage pour lasers „solides", Acta Electronica **10**, 315-330, 1966.

[11] H. T. Hayward, Joule-Thomson liquefier, Cryogenics Symp., Frankfort 1966, blz. 9-12.

[12] A. Daniels en F. K. du Pré, Closed cycle cryogenic refrigerators as integrated cold sources for infra-red detectors, Appl. Optics **5**, 1457-1460, 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verliezen. We hebben derhalve de voorkeur gegeven aan een niet-gecentreerde telescoopopstelling met een parabolische spiegel (*O* in fig. 2), waarmee door verplaatsing langs de optische as een afbeelding op variabele afstand kan worden verkregen. De kryostaat (*Cr*) van de detector, een Mullard Ge(Hg)-cel, is vast in verticale stand gemonteerd.

Aangezien de opto-mechanische aftasting vóór de

4) Synchronisatie van de aftastsignalen.

De lijnaftastsignalen, die aan de katodestraalbuis worden toegevoerd, worden gesynchroniseerd door impulsen van een optische leeskop *H*. Deze bestaat uit een gecollimeerde lichtbron en een fotocel, resp. buiten en binnen een ring *R* gemonteerd die voorzien is van een aantal spleten en die mechanisch is verbonden met het prisma.

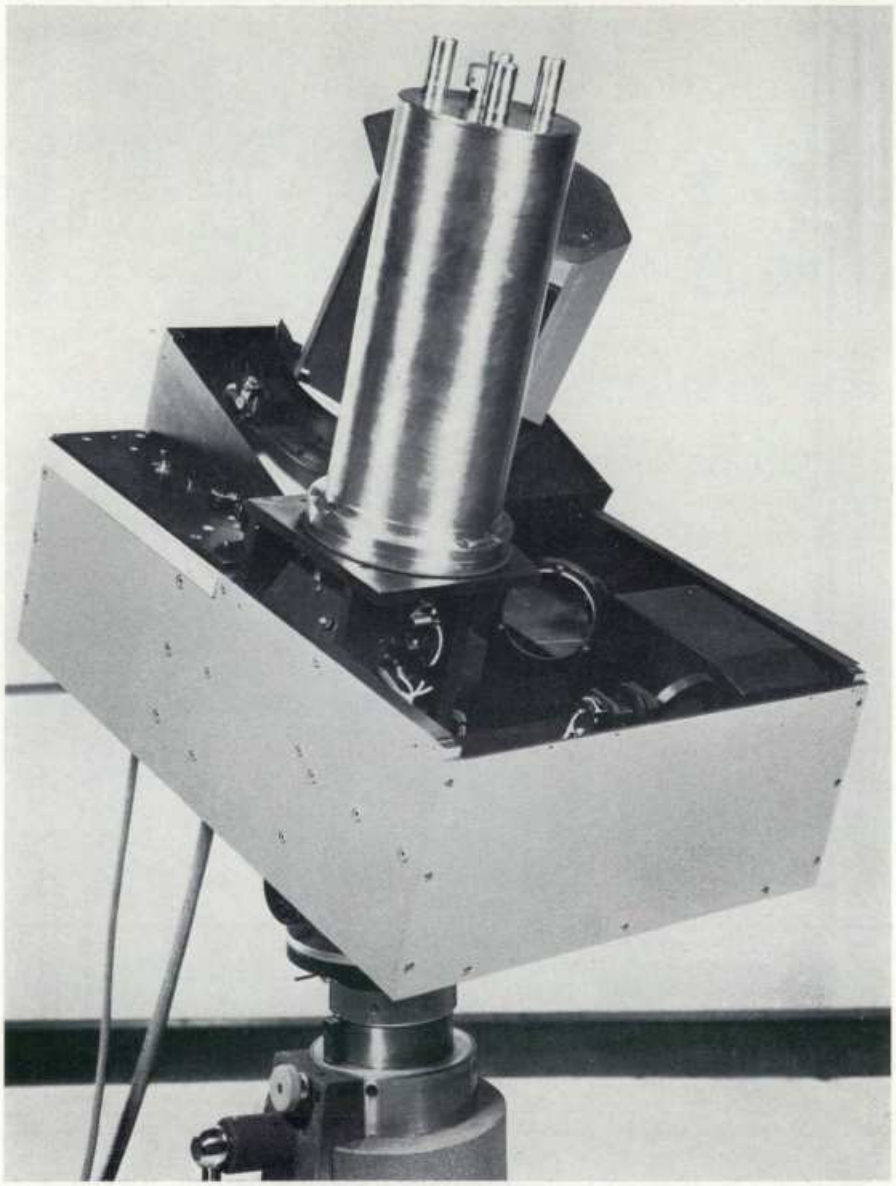


Fig. 3. Camera uitgerust met een Ge(Hg)-detector, die in een dubbelwandige kryostaat op de temperatuur van vloeibaar helium wordt gehouden.

focussering van de infrarode bundel plaatsvindt, werkt men altijd op de optische as van de telescoop, en de parameters hiervan zijn zo gekozen dat het oppervlak van de verstrooiingscirkel ook bij de kleinste voorwerpsafstand (0,8 m) kleiner blijft dan het gevoelige oppervlak van de detector.

De wipbeweging van de spiegel voor de rasteraftasting wordt afgelezen en doorgegeven door een zeer nauwkeurige potentiometer *Pot* met een sleepbaan van kunststof.

De volledige camera-opstelling is in *fig. 3* weergegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Inrichting voor het weergeven van het beeld

De inrichting voor het weergeven van het beeld bestaat in hoofdzaak uit een oscilloscoop van conventioneel type (*fig. 4*), die is uitgerust met een katodestraalbuis met een groot vlak fluorescentiescherm (diameter 180 mm). Verder is een zwaar verplaatsbaar statief geconstrueerd, dat de schakelingen voor opwekking en versterking van de aftastsignalen draagt, de videoversterker, de gelijkstroomvoedingsapparatuur en een controle-oscilloscoop. De inrichting voor het zichtbaar maken van isothermen die in de volgende paragraaf wordt beschreven, is vrijwel geheel binnen de camera ondergebracht.

De isothermenschrijver

Het principe van de in het LEP ontwikkelde isothermenschrijver is als volgt [9]. Het door de detector geleverde signaal wordt in opeenvolgende stappen versterkt en telkens in amplitude begrensd (*fig. 5*), zodat alleen de amplitudevariaties tussen twee bepaalde niveaus S_T en $S_T + \Delta S$ (die aan de temperaturen T en $T + \Delta T$ beantwoorden) een grote en geheel lineaire versterking ondergaan (van de orde van 10^7). Het gemiddelde niveau $S_T + \frac{1}{2}\Delta S$ kan willekeurig tussen de uiterste niveaus worden gekozen. Voor een getrouwe weergave van de isothermen — waarvan die met de laagste temperatuurwaarden het gehele afgetaste ge-

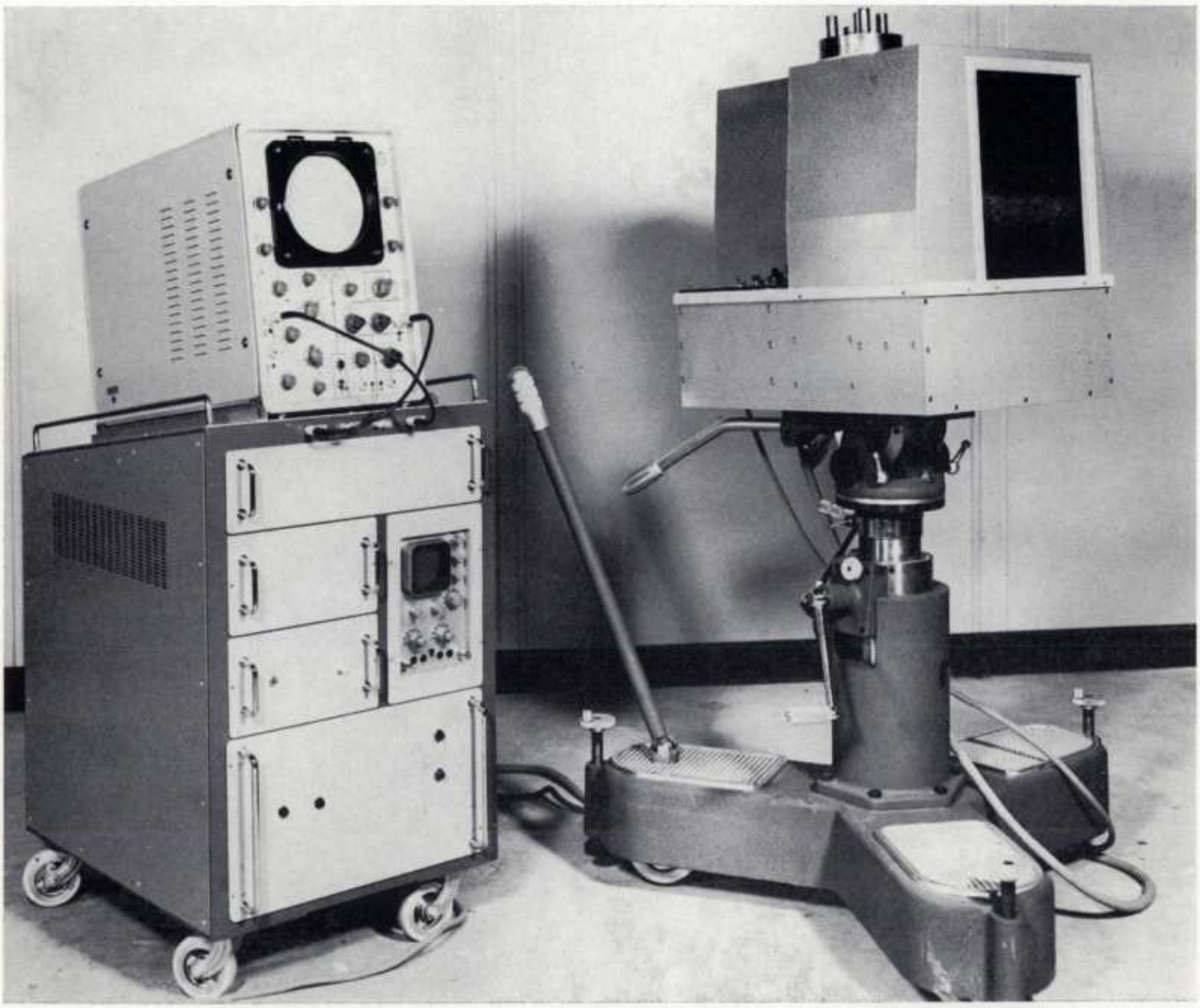


Fig. 4. De volledige experimentele thermografie-apparatuur van het LEP. De camera is op een verrijdbaar statief gemonteerd, dat is voorzien van een draaikop zodat de camera zonder verlies van stabiliteit gemakkelijk kan worden gericht. Links de op een wagentje gemonteerde apparatuur voor het weergeven van het beeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zichtsveld beslaan — moeten signalen met zeer lage frequenties vervormingsvrij worden versterkt. Als bovengrens hebben we de maximale in televisie-uitzendingen gebruikte frequentie gekozen. Voor de isothermenschrijver voor onze camera is derhalve uitgegaan van $f_{min} = 0{,}18$ Hz (met het oog hierop hebben we een elektronische schakeling met gelijkstroomkoppelingen gebruikt) en $f_{max} = 38$ kHz.

keten heen gehandhaafd blijft, beantwoordt aan de optimale voorspanning van de detector. (Men realiseert dit hetzij door een compensatieschakeling indien fotogeleiders worden gebruikt, of rechtstreeks in geval van fotospanningsdetectors.) Door de signalen die de detector *D* levert continu over de gehele schaal te „verschuiven", worden de verschillende niveaus afgetast. Dit gebeurt met behulp van de schakeling *Sh* in fig. 5,

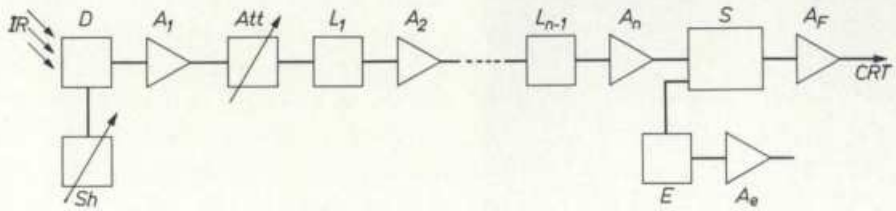


Fig. 5. Blokschema van de isothermenschrijver.

De amplitude ΔS wordt ten slotte geselecteerd aan de uitgang *S* van de elektronische keten, waarvan de versterking met behulp van een verzwakker *Att* kan worden geregeld. Iedere versterker $A_2 \ldots A_n$ wordt tegen oversturing beschermd door een begrenzer $L_1 \ldots L_{n-1}$, en de versterking van de voorversterker A_1 wordt zo gekozen dat deze door het grootste signaal, dat aan de uiterste te kiezen temperaturen beantwoordt (0 tot 60 °C), niet zal worden overstuurd. Om een beeld te krijgen dat alleen de isothermen bevat, wordt ieder signaal waarvan het niveau de bovenste selectiedrempel bereikt tot het zwartniveau teruggebracht; dit gebeurt door een omkeersignaal dat geleverd wordt door de selectieketen *S-E* en de versterker A_e. De uitgangsversterker A_F voert het resulterende signaal aan het rooster van de katodestraalbuis toe.

Het referentieniveau, dat door de hele versterker-

die de weerstand van de voorspanningsketen of de voorspanning zelf varieert.

Technische gegevens

De belangrijkste technische gegevens van de LEP-apparatuur zijn verzameld in *tabel II*. Voorts sommen we hier de mogelijkheden op die de isothermenschrijver biedt, en we illustreren deze door enkele resultaten die in het golflengtegebied nabij 10 μm zijn verkregen.

a) Nauwkeurige analyse van de informatie die de infraroodbeelden bevatten. De isothermen kunnen voor elke temperatuur tussen 0 °C en 60 °C worden weergegeven, onafhankelijk van de uitgestrektheid van de zone (afgezien natuurlijk van de beperking enerzijds tot het kleinste onderscheidbare beeldelement, anderzijds tot het gehele afgetaste beeldveld), en met een maximale nauwkeurigheid die 0,1 °C bedraagt als men een de-

Tabel II. Technische eigenschappen van de thermografie-apparatuur van het LEP.

Herhalingsfrequentie	2 beelden per seconde	
Scheidend vermogen	100 lijnen per beeld, 135 beeldelementen per lijn	
Afgetast gezichtsveld	ongeveer 420 × 560 milliradiaal (24 × 32 graden)	
Scheidend vermogen in hoekmaat	4 milliradiaal	
Voorwerpsafstand	van 0,8 m tot oneindig	
	Bij gebruik van een 10-μm-detector (Ge(Hg) bij 4 °K)	Bij gebruik van een 4-μm-detector (InSb bij 77 °K)
Thermisch scheidend vermogen bij 300 °K	< 0,05 °C	≈ 0,1 °C
Breedte van een isotherm	van 0,05 °C tot 60 °C	van 0,1 °C tot 60 °C
Temperatuurgebied waarin isothermen kunnen worden geregistreerd	0 tot 60 °C	0 tot 60 °C

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

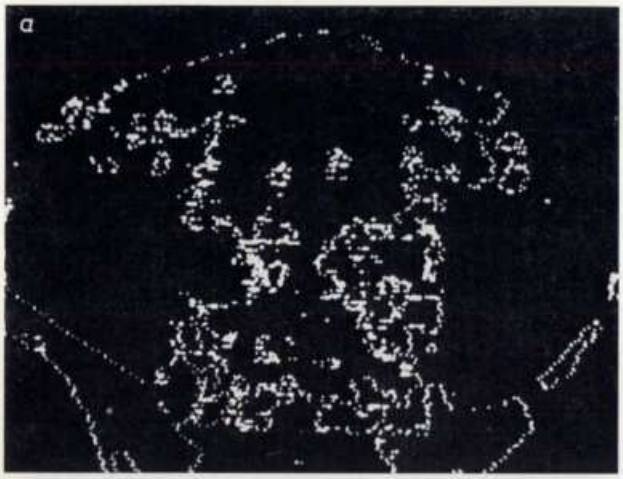
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

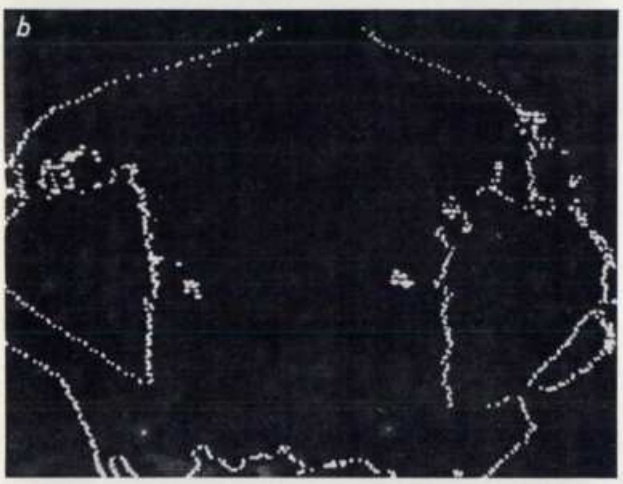
tector voor 4 μm gebruikt en 0,05 °C of nog beter met een detector voor 10 μm. Hierdoor is het mogelijk de details van de beelden nader te bekijken: verschillen in uitgestraalde energie ter grootte van het kleinste detecteerbare energieverschil komen duidelijk naar voren en men krijgt een nauwkeurige geometrische lokalisatie van de thermische details (*fig. 6a, b, c*).

b) De breedte van het temperatuurgebied dat beantwoordt aan het gehele in het beeld aanwezige luminantiegebied kan men continu tussen 0,05 °C en 60 °C laten variëren. Door deze variatie kan men de nauwkeurigheid waarmee de isothermen worden weergegeven willekeurig kiezen (fig. 6*a*, *c*). Bovendien kan het contrast van de weergegeven beelden worden verbeterd door de breedte van het gekozen amplitudegebied naar gelang van de uiterste in de scène voorkomende temperaturen te regelen, rekening houdende met de eigenschappen van de fosfor van het scherm van de katodestraalbuis (of die van de fotografische film). Dit wordt geïllustreerd door *fig. 7a, b*.

c) Superpositie van de isothermen op een met normaal contrast weergegeven beeld (fig. 7*b*).

d) Men kan snel vaststellen in welk gedeelte van het





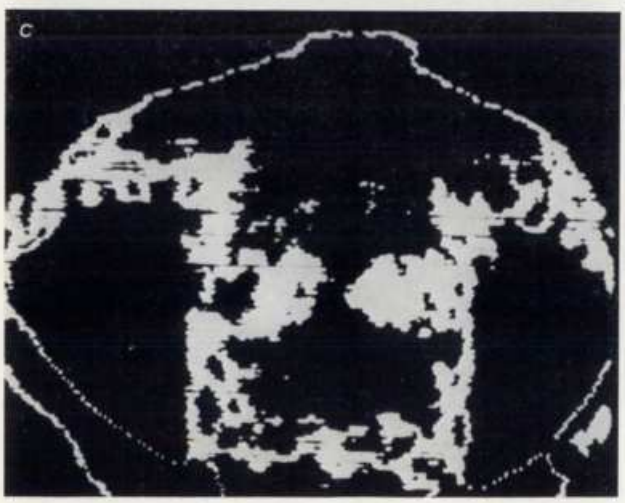


Fig. 6. Registratie van de isotherme gebieden van een vrouwenborst. In de drie figuren zijn de isothermen met verschillend thermisch scheidend vermogen ΔT en bij verschillende temperaturen opgenomen: *a*) $\Delta T < 0{,}05$ °C bij een bepaalde temperatuur T_1. *b*) $\Delta T < 0{,}05$ °C bij een temperatuur $T_2 < T_1$. *c*) $\Delta T \approx 0{,}2$ °C bij $T_3 \approx T_1$.

Fig. 7. Infraroodbeelden van een gezicht. *a*) Opname voor het aantonen van luminantiecontrasten in het haar. *b*) Opname voor het aantonen van contrasten in de huidtemperatuur. Op het beeld zijn de contour van het gezicht en één isotherm gesuperponeerd.

De in (*a*) en in (*b*) gereproduceerde contrasten kunnen niet in een enkel beeld worden waargenomen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

beeld de temperatuur hoger is dan op een zichtbaar gemaakte isotherm. Deze mogelijkheid is van belang indien men bij het onderzoek een isotherm krijgt die verscheidene donkere gebieden omsluit, waarvan elk zowel warmer als kouder kan zijn (*fig. 8*).

e) Het volledig in kaart brengen van een temperatuurverdeling, door op een enkele fotografische film of op het scherm van een geheugenbuis de isothermen die voor verschillende niveaus worden verkregen te superponeren (*fig. 9*).

f) Door vergelijking met referentiebronnen kunnen temperatuurverschillen en ook absolute temperaturen worden gemeten. Bij gebruik van een Ge(Hg)-detector beantwoordt de maximale nauwkeurigheid die men bij rechtstreekse vergelijkingen in het beeld kan bereiken aan een temperatuurverschil van minder dan 0,05 °C tussen twee zwarte lichamen.

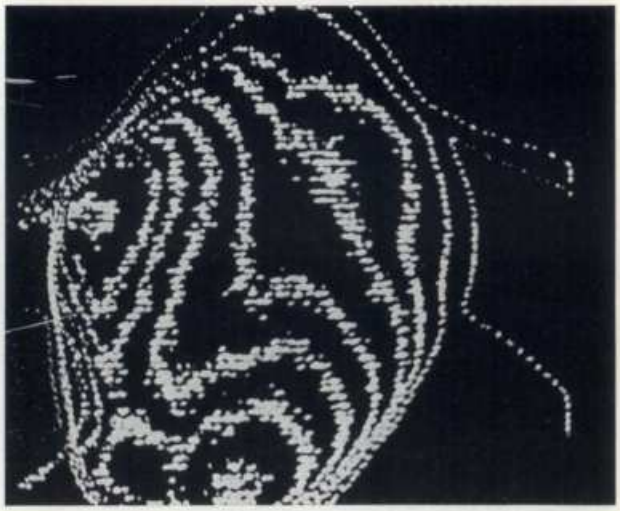


Fig. 9. In kaart gebrachte temperatuurverdeling van een blad van Ficus elastica. Op een isotherm is de temperatuur binnen minder dan 0,05 °C constant, het temperatuurverschil tussen opeenvolgende isothermen is ongeveer 0,1 °C, het totale temperatuurgebied ongeveer 1,2 °C. De temperatuur neemt van de rand van het blad naar het cirkelvormige gebied dat zich links bevindt toe.

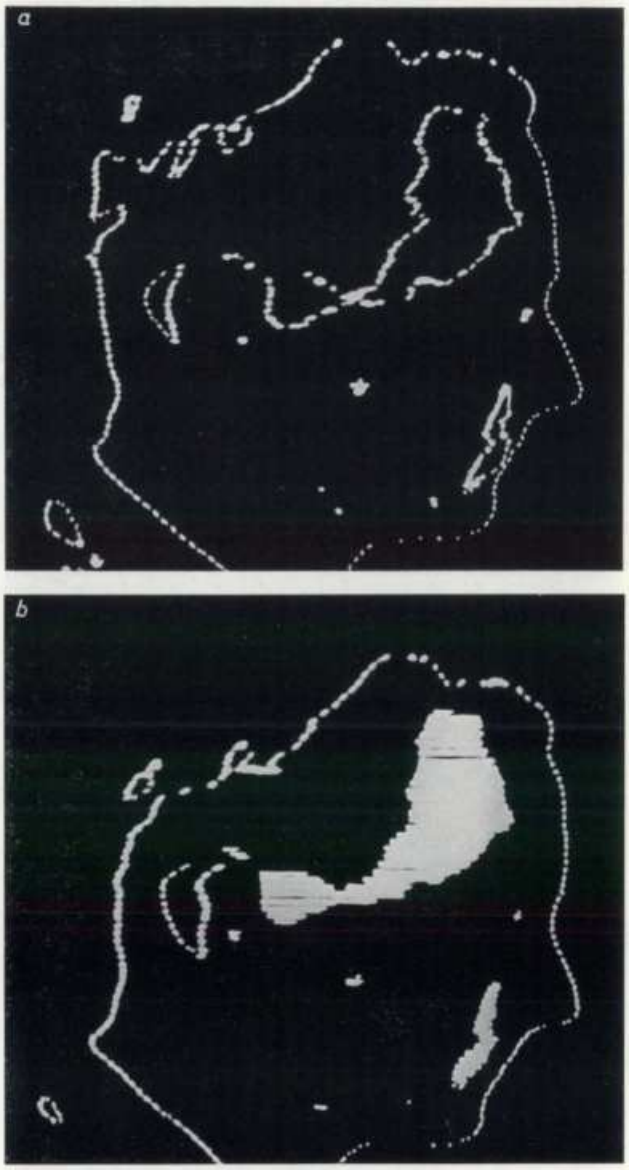


Fig. 8. Infraroodbeelden van een gezicht, opgenomen met de isothermenschrijver. *a*) Isothermen voor $T = 34$ °C. *b*) Gebieden met een temperatuur boven 34 °C.
De contour van het gezicht is met dezelfde apparatuur opgenomen maar met een andere instelling.

Conclusies uit de medische beproeving van de apparatuur

Sedert eind 1967 is de LEP-apparatuur experimenteel in gebruik in de Centrale Röntgenologische Afdeling (onder leiding van prof. Gros) van de Hospices Civils te Straatsburg. In deze afdeling houdt een groep artsen en fysici zich bezig met de fundamentele problemen van de medische thermografie. In verschillende klinische afdelingen heeft deze groep met een Barnes-thermograaf reeds enige duizenden patiënten onderzocht [13], en men heeft proeven gedaan met allerlei soorten apparatuur. Het onderzoek van elke patiënt gebeurt in een speciale thermografiezaal, die op constante temperatuur wordt gehouden (21 ± 1 °C) [14]; men wacht met het onderzoek tot ongeveer 15 minuten nadat de patiënt is klaargemaakt.

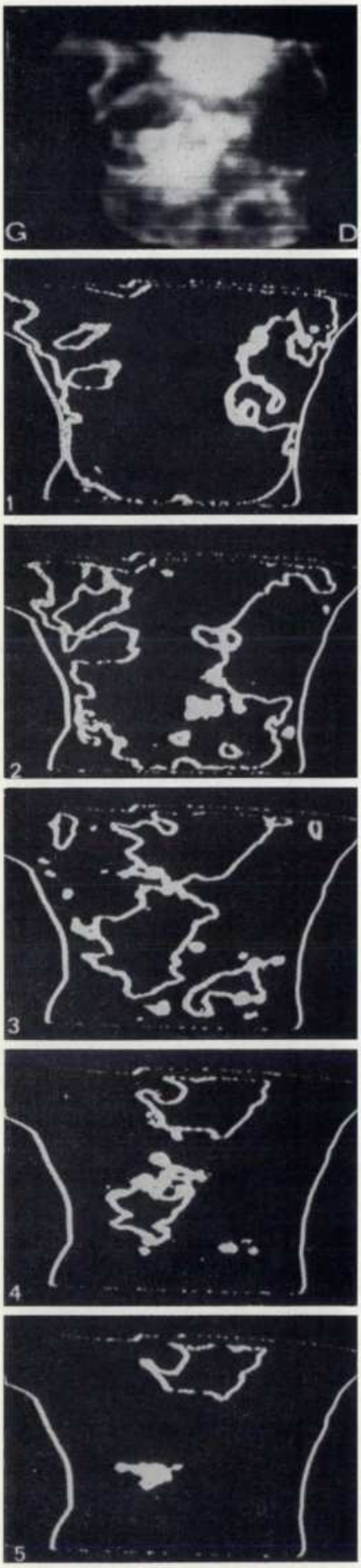
Een onderzoek met de LEP-apparatuur bestaat uit het maken van een foto met zo goed mogelijk contrast en het registreren van een reeks van vier tot zes isothermen. De keuze van de temperatuurniveaus voor deze isothermen maakt men aan de hand van een voorafgaand onderzoek door directe inspectie van het scherm van de katodestraalbuis (thermoscopie). In de *fig. 10* en *11*, die ons welwillend ter beschikking gesteld zijn

[13] Colloque international de thermographie médicale, Straatsburg 1966, J. Radiologie **48**, 1-98, 1967.

[14] Ch. Gros, M. Gautherie en P. Bourjat, Conception d'une salle de thermographie médicale, J. Radiologie **49**, 371-372, 1968 (no. 5).

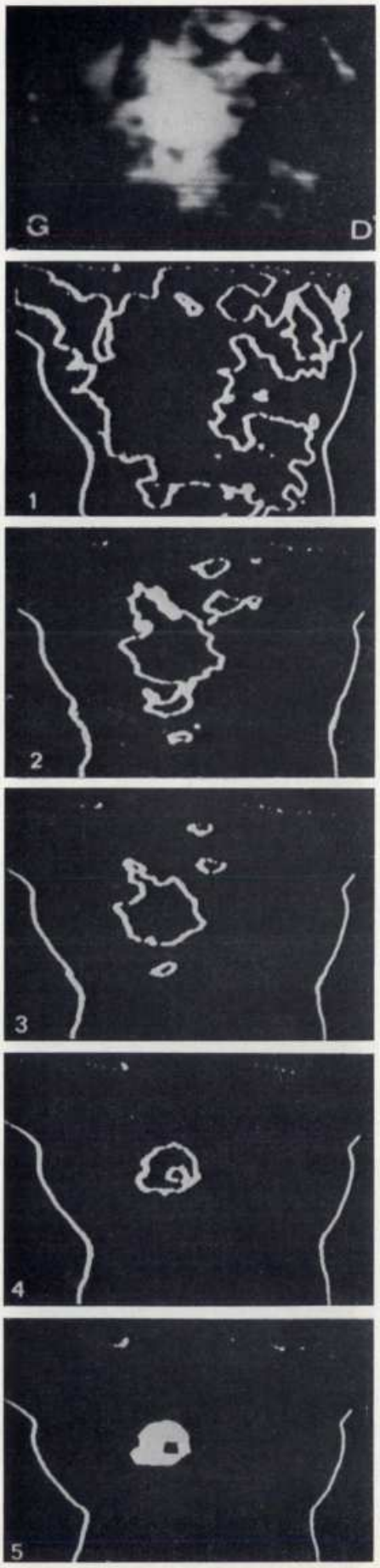
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



←

Fig. 10. Infraroodbeelden van de thorax van een vrouw, waarop een in een holte gevormd abces in de linkerborst zichtbaar is.
Bovenaan: beeld met normaal contrast.
1-5: vijf opnamen van isothermen met van *1* tot *5* opklimmende temperatuur.
De isothermen zijn gesuperponeerd op een beeld dat de contourlijn van het lichaam weergeeft.



→

Fig. 11. Beelden van de thorax van een vrouw met epithelioma, gezwelvorming in de linkerborst.
Bovenaan: beeld met normaal contrast.
1-4: vier opnamen van isothermen met van *1* tot *4* opklimmende temperatuur.
5: beeld van het gehele gebied waarin de temperaturen *boven* die van de isothermen in *4* liggen.
De isothermen zijn gesuperponeerd op een beeld dat de contour van het lichaam weergeeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

door de Röntgenologische Afdeling te Straatsburg, ziet men voor twee gevallen het resultaat van een onderzoek dat met de LEP-apparatuur in het gebied van 10 μm werd gedaan.

Mogelijkheden en moeilijkheden van de medische thermografie

Medische experts beschouwen de thermografie als een aanvulling op de meer conventionele wetenschappelijke onderzoekmethodes (röntgenologie, scintigrafie, histologie enz.) [13][15]. Aantrekkelijk is de methode niet alleen wegens het ongewone van de informatie die zij verstrekt, maar ook omdat zij zowel voor de patiënt als voor diegene die het onderzoek uitvoert volmaakt ongevaarlijk is. De belangrijkste speciale problemen waarvoor de thermografie naar het schijnt een essentiële bijdrage kan leveren zijn de mammografie (het constateren en lokaliseren van borstkanker), het onderzoek van vaatziekten, de rheumatologie, de placentografie, de laryngologie, het onderzoek van de werking van geneesmiddelen en vaccins, het onderzoek van de ontwikkeling van huidtransplantaties enz.

Toch schijnt de ontwikkeling van de medische thermografie ook thans nog af te hangen van de oplossing van de fundamentele kwestie, hoe de beelden uit fysisch en medisch oogpunt moeten worden geïnterpreteerd [16].

De knelpunten zijn daarbij de bepaling van temperatuurverschillen en absolute temperaturen uit de infrarode straling, de kennis van de mechanismen van temperatuurstabilisatie die een verandering van de huidtemperaturen met de tijd ten gevolge hebben, en een begrip voor de processen waardoor interne pathologische verschijnselen zich door thermische anomaliën kunnen manifesteren. De sleutel tot dit alles zal mede moeten worden geleverd door een verbetering van de thermografische apparatuur, met een nog betere aanpassing aan de medische toepassingen.

Enkele detailresultaten

1) De uitkomsten van röntgenologisch en klinisch onderzoek van borstkanker worden in ongeveer 80% van de gevallen door het thermografische onderzoek gestaafd.

2) Het zichtbaar maken van nauwkeurige isothermen veroorlooft een betere lokalisatie van pathologische afwijkingen dan op een normale foto mogelijk is. Hierdoor is een nauwere correlatie tussen het thermografische en het röntgenografische onderzoek te verwachten.

3) Door het grote temperatuuronderscheidingsvermogen en door de extra-mogelijkheden die de isothermenschrijver biedt, worden door de LEP-apparatuur, zoals gebleken is, ongeveer 20% meer pathologische gevallen aan het licht gebracht dan bij gebruik van een thermograaf met een bolometrische detector. Het schijnt echter dat de gevoeligheid van de apparatuur ook voldoende zou zijn als het minimale aantoonbare temperatuurverschil 0,1 °C zou bedragen [17][18] en zou beantwoorden aan de minimale afstand tussen twee isothermen.

4) Na een korte aanpassingsperiode kan de gebruiker de beelden rechtstreeks waarnemen zonder door de lage beeldherhalingsfrequentie te worden gehinderd. De directe waarneming veroorlooft de bestudering van dynamische verschijnselen zoals de natuurlijke of kunstmatige afkoeling van het huidoppervlak en de werking van medicijnen en vaccins.

In sommige gevallen kan men de thermische contrasten verbeteren door het onderzochte lichaamsdeel kunstmatig te koelen; dit is daaraan te danken dat gezonde en pathologische huidgedeelten verschillende afkoelingssnelheden bezitten [18].

5) Vergelijkt men beelden met normaal contrast die gelijktijdig van hetzelfde object verkregen zijn, enerzijds met de LEP-apparatuur, werkende bij 10 μm (Ge(Hg)-detector), en anderzijds met de Barnes-thermograaf, dan komt men tot de conclusie dat de huid zich inderdaad als een grijze straler gedraagt, zoals eerder opgemerkt (zie blz. 285). In hoeverre gezonde en pathologische huidgedeelten zich verschillend gedragen, dus verschillen vertonen wat betreft het uitgestraalde infrarode vermogen bij verschillende golflengten, bij verschillende temperaturen en bij waarneming onder verschillende hoeken, moet nog nader worden onderzocht.

6) Wegens de variatie van de huidtemperatuur met de tijd [18][19] moet de waarnemingsduur van het onderzochte lichaamsdeel kort genoeg zijn om zeker te zijn dat hierdoor veroorzaakte fouten kleiner blijven dan het minimale temperatuurverschil dat door de apparatuur kan worden gedetecteerd. Deze toelaatbare waarnemingstijd hangt vooral af van het onderzochte lichaamsdeel, van de sterkte van de kunstmatige koeling of — als men met een natuurlijke afkoeling te maken heeft — van de adaptatietijd van de patiënt, en van de omgevingstemperatuur (*fig. 12*). Wil men een aantal vooraf gekozen isothermen registreren, dan moet dit gebeuren binnen een tijd die hoogstens gelijk

[15] Thermography and its clinical applications, Ann. New York Acad. Sci. **121**, art. 1, 1-304, 1964.

[16] R. Genève, Introduction à la thermographie médicale, Acta Electronica **12**, 7-19, 1969, (no. 1).

[17] Ch. Gros, M. Gautherie, P. Bourjat en C. Vrousos, Thermographie des affections mammaires, in: Medical thermography, Proc. Boerhaave Course Postgrad. Med. Educ., Leiden 1968, blz. 68-81.

[18] Ch. Gros, M. Gautherie, P. Bourjat en C. Vrousos, Les applications médicales de la thermographie infrarouge, Acta Electronica **12**, 63-119, 1969 (no. 1).

[19] A. C. Burton, The pattern of response to cold in animals and the evolution of homeothermy, in: Temperature, its measurement and control in science and industry, Vol. 3, deel 3, red. J. D. Hardy, Reinhold Publ. Co., New York 1963, blz. 363-371.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

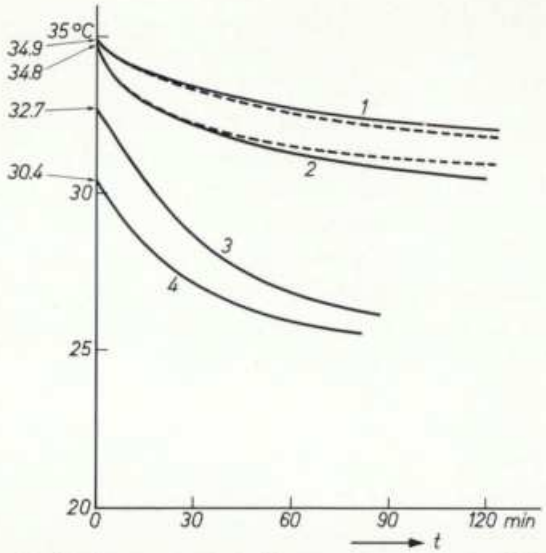


Fig. 12. Verloop van de huidtemperatuur van verschillende lichaamsdelen als functie van de tijd t, volgens het experiment (getrokken lijnen) en volgens de theorie (gestippelde lijnen). De krommen hangen af van de omgevingstemperatuur T_a. (Overgenomen van Ch. Gros, M. Gautherie, P. Bourjat en C. Vrousos [18].) *1* onderarm, $T_a = 23{,}5$ °C. *2* onderlichaam, $T_a = 22{,}1$ °C. *3* hand, $T_a = 21{,}2$ °C. *4* voet, $T_a = 21{,}8$ °C. De nauwkeurige begintemperatuur is voor elk geval aangegeven.

mag zijn aan de genoemde waarnemingstijd. Dit beperkt de tijd die voor de beeldvorming ter beschikking staat. Wil men b.v. bij een patiënt die een adaptatietijd van slechts 5 minuten heeft een onderzoek uitvoeren waarvoor 10 isothermen (nauwkeurigheid 0,1 °C) moeten worden geregistreerd, dan mag de beeldvorming hoogstens 4 seconden in beslag nemen.

7) Voor een gemakkelijker interpretatie van de resultaten is het gewenst isothermen van verschillend niveau in verschillende kleuren op een zelfde foto op te nemen.

8) Voor borstopnamen gemaakt op een afstand van 1½ à 2 meter is een scheidend vermogen van enkele millimeters voldoende. Deze waarde vindt men als resultaat van een compromis tussen de ideale waarnemingsomstandigheden en de technische eisen.

Toekomstige thermografische apparatuur

Uit de tot dusver door de medici getrokken conclusies en uit de technische ervaringen die bij de ontwikkeling en het praktische gebruik van de beschreven experimentele apparatuur zijn opgedaan, hebben wij de belangrijkste eigenschappen kunnen afleiden die een speciaal voor medisch gebruik bestemd thermografieapparaat zal moeten hebben.

Aansluitend bij de eisen die wij met het oog op verschillende doelstellingen aan het begin hebben geformuleerd, speciaal wat betreft de methode van beeldweergave op het scherm van een katodestraalbuis, kunnen we nu de volgende specificatie voor een nieuwe apparatuur opstellen.

Het scheidend vermogen, in hoeken uitgedrukt, zou moeten worden verbeterd tot 1,5 milliradiaal. Het afgetaste veld zou moeten worden aangepast aan de afmetingen van medische objecten (ongeveer 210×280 milliradiaal, d.i. 12×16 graden), en hetzelfde geldt voor het thermische scheidend vermogen (0,1 °C). Bij voorkeur zou moeten worden gewerkt bij golflengten in de buurt van 10 μm, waarvoor puntvormige detectors van Ge(Hg) kunnen worden gebruikt of in de nabije toekomst CdHgTe-detectors die tot de temperatuur van vloeibare stikstof worden afgekoeld. De mogelijkheden die de isothermenschrijver biedt, moeten worden behouden en zelfs nog uitgebreid door halfautomatische registratie, registratie in kleuren en de superpositie van een beeld met normaal contrast.

Door keuze van een andere configuratie voor de opto-mechanische aftastsystemen (gebruik van een pyramidevormig prisma voor de lijnaftasting) zal wellicht een compactere camera dan de thans in de experimentele apparatuur gebruikte kunnen worden ontwikkeld.

Het is te voorzien dat de invoering van beeldbuizen die berusten op een elektro-optisch effect en waarbij in het geheel geen flikkeren optreedt (zoals de in het LEP ontwikkelde TITUS-buis [20]) spoedig tot de ontwikkeling van een geheel nieuwe klasse van thermografieapparatuur zal leiden. Tot dusver werd aan de duur van een beeldaftasting een bovenste grens gesteld door de tijdconstante van de fosfor: bij de nieuwe buizen zal deze beperking niet meer bestaan, de grens zal dan alleen worden gesteld door het te bestuderen verschijnsel. Zo zal het b.v. ook mogelijk worden een afbeelding met groot scheidend vermogen te verkrijgen zonder vermindering van het temperatuuronderscheidingsvermogen.

Verdere uitbreiding van het toepassingsgebied van de thermografie

Voor de thermografie bestaan zeker talrijke toepassingsmogelijkheden ook in de wetenschap en in de industrie. Immers, vele verschijnselen hebben een thermodynamische achtergrond, en door de kennis van oppervlaktemperaturen zal men b.v. inwendige warmtebronnen kunnen lokaliseren of de warmte-uitwisseling met de omgeving kunnen bestuderen.

De gewenste eigenschappen van de apparatuur zullen voor ieder toepassingsgebied anders zijn. We noemen hier enkele gevallen: voor de inspectie van geminiaturiseerde of geïntegreerde elektronische schakelingen zal een groot geometrisch scheidend vermogen gewenst zijn; voor thermodynamische verschijnselen bij modellen in

[20] G. Marie, Un nouveau dispositif de restitution d'images utilisant un effet électro-optique: le tube TITUS, Philips Res. Repts. **22**, 110-132, 1967. Zie ook dit nummer, blz. 302.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

supersone windtunnels heeft men een grote aftastsnelheid nodig; voor biologische onderzoekingen in het planten- en dierenrijk een grote gevoeligheid; in de meteorologie en voor het in kaart brengen van luchttemperaturen moet men op grote afstand waarnemen (bovendien zal men in dit geval met de problemen van de doorlating van de atmosfeer te maken krijgen). Zolang echter het te bestrijken temperatuurgebied in de buurt van de omgevingstemperatuur blijft, zullen de fundamentele problemen van de thermografie dezelfde blijven als die welke hierboven voor de medische toepassingen zijn beschreven.

Om deze reden zal naar onze mening de beschreven apparatuur in vele gevallen bruikbaar kunnen zijn om de experimentele omstandigheden bij deze of gene toepassing nader te bepalen en ze zal er derhalve toe kunnen bijdragen de vereiste technische eigenschappen voor meer gespecialiseerde apparaturen vast te stellen.

Samenvatting. In het LEP is een apparatuur voor thermografie ontwikkeld die bij 300 °K een thermisch scheidend vermogen bezit van 0,05 °C of nog beter en die in verschillende golflengtegebieden kan werken (in het bijzonder bij 4 en bij 10 μm). De apparatuur bevat een speciale inrichting voor het zichtbaar maken van isothermen, met een nauwkeurigheid van minstens 0,05 °C. In het artikel worden eerst de belangrijkste technische doelstellingen geschetst, aan de hand waarvan de eisen voor de ontwikkeling van de apparatuur zijn opgesteld. Daarna wordt de camera beschreven, die werkt met een puntvormige quantumdetector (InSb voor 4 μm, Ge(Hg) voor 10 μm) en met een opto-mechanisch aftastsysteem. De elektronische inrichting waarmee isothermen van de onderzochte oppervlakken rechtstreeks op het scherm van een katodestraalbuis zichtbaar kunnen worden gemaakt, wordt in het kort beschreven. De mogelijkheden die deze waarnemingsmethode biedt worden besproken en met enkele voorbeelden geïllustreerd. Het laatste gedeelte van het artikel is gewijd aan de toepassingen van de thermografie en speciaal die op medisch gebied. Uit de resultaten van het onderzoek van talrijke patiënten met een thermografie-apparatuur van het LEP in de Hospices Civils te Straatsburg worden een aantal conclusies getrokken. Op grond van de opgedane ervaring en de mogelijke technische verbeteringen die men voor de tegenwoordige camera kan voorzien, kan een specificatie voor een verbeterde uitvoering van de apparatuur worden opgesteld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Lenzenstelsels voor afbeelding in het infrarood

C. Hily

In de Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée zijn infrarood-lenzenstelsels ontwikkeld voor gebruik in combinatie met fotogevoelige lagen.

Het spectrale gebied waarin het optische systeem bruikbaar moet zijn wordt bepaald door de doorlaatbanden van de atmosfeer enerzijds en door de gevoeligheidsgrens van de te gebruiken detector anderzijds. We komen aldus tot de volgende indeling van het spectrum:

a) Het golflengtegebied tussen 1,2 en 2,8 μm. Hier kan men gebruik maken van germaniumdetectors (gevoeligheidsgrens 1,8 μm), loodsulfidedetectors (grens 2,7 μm), indiumarsenidecellen (grens 3,4 μm), of van een hiermee ontwikkelde televisie-opneembuis van het vidicontype [1].

b) Het gebied van 3,3 tot 5,5 μm. Hiervoor zijn een groot aantal halfgeleiders bruikbaar (InSb, PbTe, PbSe).

c) Golflengten boven 8 μm. Hier kunnen òf thermische detectors worden gebruikt (zoals b.v. bolometers) òf — zoals in de vorige gebieden — foto-detectors (b.v. germanium gedoteerd met kwik, gemengde tellurides van cadmium met kwik, lood of tin).

Met het oog op deze te gebruiken golflengtegebieden moeten de voor de lenzenstelsels toe te passen materialen worden gekozen. Slechts weinig materialen zijn hiervoor geschikt. De belangrijkste eigenschappen van de in aanmerking komende materialen vindt men in publikaties van Billard en Cornillault [2].

De klassieke optische glazen, alle gecomponeerd op basis van SiO_2, zijn doorlatend tot 2,8 μm. Alleen bij zeer SiO_2-arme loodglazen en bij glazen waarin germaniumoxide de belangrijkste glasvormende component is (b.v. G0018 en VIR 3 van SOVIREL) loopt het doorlaatgebied tot voorbij 4,5 μm. Calciumaluminaatglazen zijn transparant tot 6 μm, glazen op basis van arseensulfide tot 11-12 μm, en gesinterde glazen (Irtran 1 en 2 van Kodak) gaan tot 8,5 en 14 μm.

Men gebruikt ook wel monokristallen van stoffen als MgO, CaF_2, Si, Ge enz., die doorlatend zijn tot resp. 8,5 μm, 12 μm, 15 μm en 23 μm.

C. Hily, ingénieur E. S. O., medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Het gebied tussen 1,2 en 2,8 μm

Het objectief voor het gebied van 1,2 tot 2,8 μm werd ontworpen voor de reeds genoemde televisie-opneembuis van het vidicontype [1]. Het beeldveld moest het lichtgevoelige oppervlak hiervan beslaan, d.i. een oppervlak met een diameter van 25 mm. Het scheidend vermogen moest vrij groot zijn, nl. 600 punten per lijn (in televisietermen uitgedrukt).

Voor het beoogde doel was een brandpuntsafstand van 50 mm gewenst, zodat de vereiste beeldhoek zeer groot werd. Het was derhalve noodzakelijk behalve voor sferische aberratie en coma ook voor astigmatisme en beeldveldkromming te corrigeren. Het objectief moest hiertoe uit verscheidene elementen worden opgebouwd. De in het LEP uitgewerkte oplossing is afgeleid van het Taylor-triplet: de beide buitenste elementen zijn convergerend, het middelste is divergerend. Het uiteindelijke systeem bestaat uit vijf lenzen: het front-element van het triplet bestaat uit twee lenzen van VIR 3 en MgO, het middelste element wordt gevormd door twee kwartsglaslenzen, en het achterste is een enkelvoudige lens van extra-zwaar flintglas. Het objectief is weergegeven in *fig. 1*, de samenstelling van het systeem is ge-

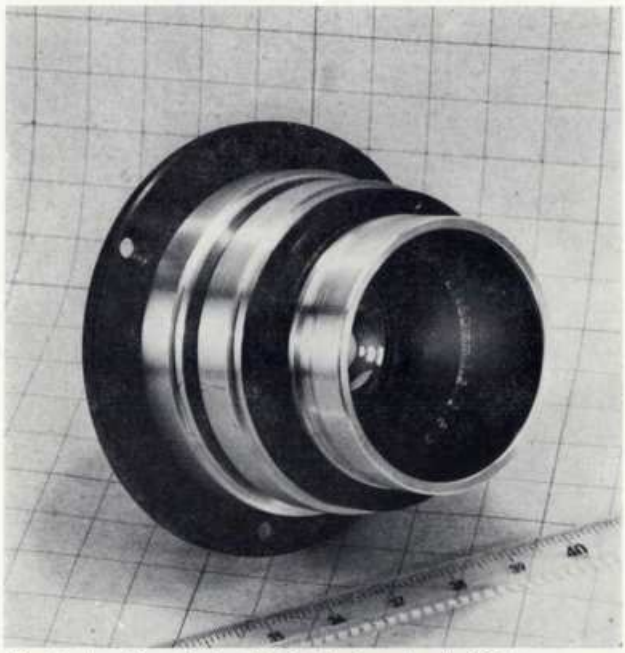


Fig. 1. Anastigmatisch objectief bestaande uit vijf lenzen, voor 1,2-2,8 μm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schetst in *fig. 2*. In *fig. 3* is de contrastoverbrengingsfactor M uitgezet als functie van de lijnafstand v (ruimtelijke frequentie) in het brandvlak aan de beeldzijde.

Het gebied tussen 3,3 en 5,5 μm

In het gebied tussen 3,3 en 5,5 μm wordt als detector een langs een lijn gerangschikte reeks cellen gebruikt, met een gering scheidend vermogen (elk detectorelement heeft afmetingen van 200 tot 500 μm) [3]. Hierdoor werd de oplossing eenvoudiger: er kon worden volstaan met een Ge-Si-doublet, en de beeldveldkromming kan, zo nodig, worden gecorrigeerd met een in het beeldvlak geplaatste negatieve lens. Een optisch systeem van dit type, met een brandpuntsafstand van 100 mm en een beeldvelddiameter van 20 mm, is in het LEP gerealiseerd met Ge- en Si-monokristallenzen van 75 mm diameter.

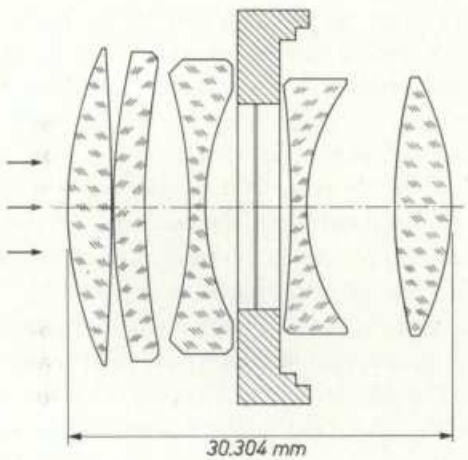


Fig. 2. Samenstelling van het objectief voor 1,2-2,8 μm.

Het gebied boven 8 μm

In het LEP worden thans lenzensystemen, spiegeloptieken en gecombineerde optieken ontwikkeld voor golflengten tussen 14 en 16 μm, met het oog op hun toepassing voor horizonaftasters in satellieten en voor infrarood-simulators.

Voor lensoptieken of gecombineerde optieken in dit gebied lijkt momenteel alleen germanium bruikbaar te zijn. Verschillende hierop gebaseerde optische systemen zijn in ontwikkeling: excentrische Mangin-spiegels en lenscollimators van monokristallijn germanium (sommige van deze systemen hebben een opening met een diameter tot 200 mm). Met deze optieken wordt niet dezelfde afbeeldingskwaliteit bereikt als met systemen voor zichtbaar licht, want een goede correctie van de verschillende lensfouten zou een combinatie van verschillende optische materialen vereisen en hierover beschikt men in het infrarood boven 14 μm momenteel nog niet.

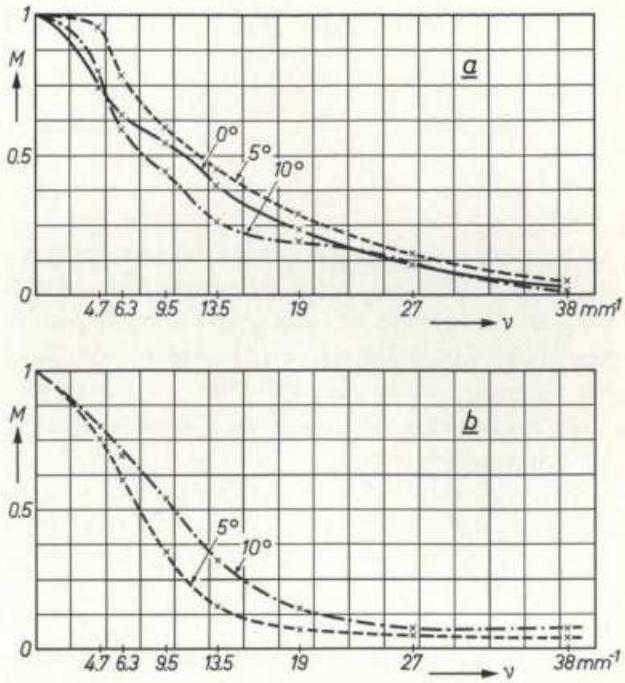


Fig. 3. Contrastoverbrengingsfactor M van het objectief als functie van de lijnafstand v (ruimtelijke frequentie) voor verschillende gezichtshoeken, bij instelling op dat vlak waarvoor M maximaal is (gemeten op de as bij $v = 25$ mm^{-1}).
a) Rasterlijnen loodrecht op het vlak door optische as en centrale straal.
b) Rasterlijnen evenwijdig met het vlak door optische as en centrale straal.

Samenvatting. Met het oog op de beschikbare detectors wordt het infrarood in drie spectrale gebieden verdeeld. Voor de vervaardiging van optieken voor deze gebieden staat slechts een beperkte keuze van materialen ter beschikking. Enkele voorbeelden van uitgevoerde optieken worden hier beschreven: een anastigmatisch Taylor-triplet, dat uit vijf elementen bestaat, voor het gebied van 1,2-2,8 μm; vrijstaande doublets van germanium en silicium voor 3,3-5,5 μm; en combinaties van lenzen (van germanium) of van lenzen en spiegels voor 14-16 μm.

[1] M. Berth en J.-J. Brissot, blz. 277 in dit nummer. Zie ook: M. Berth en R. Petit, Acta Electronica **10**, 123-135, 1966.
[2] P. Billard, Acta Electronica **6**, 7-64, 1962.
P. Billard en J. Cornillault, Acta Electronica **6**, 73-169, 1962.
[3] Zie het artikel van F. Desvignes, J. Revuz en R. Zeida, blz. 270 in dit nummer, speciaal fig. 6.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Vensters met een breed spectraal doorlaatgebied

R. Legoux

In allerlei soorten vacuümbuizen worden fotogeleidende of foto-emitterende detectors voor elektromagnetische straling gebruikt die veelal een spectrale gevoeligheidsverdeling tot ver in het ultraviolet of het infrarood bezitten. Men moet de buizen dan kunnen voorzien van vensters met een overeenkomstig optisch doorlaatgebied.

Glas, dat men voor de vervaardiging van elektronenbuizen het liefst gebruikt omdat het zo goedkoop en gemakkelijk te verwerken is, heeft een betrekkelijk beperkte spectrale doorlating. Het moet derhalve voor het genoemde doel worden vervangen door andere, gewoonlijk hoogsmeltende, materialen die in het gewenste gebied doorlatend zijn.

Gewoonlijk werkt men met monokristallijne materialen, in natuurlijke of synthetische vorm, zoals korund, kwarts, vloeispaat, lithiumfluoride, periklaas enz.; ook stoffen met een heel eenvoudige kristalstructuur worden gebruikt, zoals germanium en silicium.

Om van deze materialen vacuümdichte vensters voor buizen te vervaardigen waarin de restdruk gedurende zeer lange tijd, b.v. enkele jaren, tot een waarde van 10^{-10} torr of minder beperkt moet blijven, zijn zeer speciale technieken vereist. In tegenstelling tot glas kunnen nl. de meeste genoemde materialen niet rechtstreeks aan de glazen of metalen wanden van de buis worden gesmolten. De techniek die men voor het aansmelten van dergelijke vensters moet toepassen lijkt veel op die welke men in de moderne industrie voor het hardsolderen van metalen of keramiek toepast. We noemen enkele eisen waar men rekening mee moet houden.

a) Het te gebruiken soldeer mag geen metalen met hoge dampdruk zoals cadmium, zink, mangaan en lood bevatten; dit omdat de buis en dus ook de soldeerplaatsen na het afsmelten aan warmtebehandelingen bij relatief hoge temperaturen zullen worden blootgesteld.

b) Om dezelfde reden moet men ervan afzien voor de bevochtiging van de soldeerplaatsen een etsing met een vloeimiddel toe te passen, daar dit gewoonlijk enigszins in het soldeer oplost. Het solderen moet derhalve worden uitgevoerd hetzij in een gecontroleerde (neutrale of reducerende) atmosfeer, hetzij in vacuüm. Solderen in vacuüm heeft het voordeel dat de te verbinden gedeelten enigszins worden ontgast en derhalve de kans op bepaalde ongewenste reacties tussen de werkstukken en het gas (of verontreinigingen hiervan) zoveel mogelijk wordt vermeden.

In de praktijk wordt het aan te smelten venster vlak op een drager gemonteerd, of, nog vaker, in een in de drager uitgefreesde sponning waarin het zonder speling past (*fig. 1*).

De nadere keuze van het materiaal en de nauwkeurige vorm van de drager hangen voor een bepaald soort venster nog af van allerlei technische overwegingen, die in verband staan met de fysische eigenschappen van de te verbinden gedeelten, in het bijzonder de uitzettingscoëfficiënt, de elasticiteitsmodulus en de warmtegeleiding. Andere belangrijke factoren zijn de brosheid van het venstermateriaal en de metallurgische combineerbaarheid van het soldeer met het venster en de drager.

Gewoonlijk zorgt men ervoor dat de uitzettingscoëfficiënten zo goed mogelijk bij elkaar passen, aangezien de aansmeltingen dan gemakkelijker te vervaardigen zijn en minder spanningen zullen bevatten, dus betrouwbaarder zullen blijven. Kan men de uitzettingscoëfficiënten niet precies gelijk maken, dan is het vaak raadzaam ervoor te zorgen dat de drager een iets hogere uitzettingscoëfficiënt heeft dan het venster, en de aansmelting met een sponning uit te voeren. Men krijgt dan een aansmelting die vacuümdicht kan zijn, maar die het nadeel heeft dat het venster zich onder een permanente mechanische spanning bevindt. Nog afgezien van de grotere kans op springen van de gesoldeerde gedeelten, kan de mechanische spanning ook een ongewenste pola-

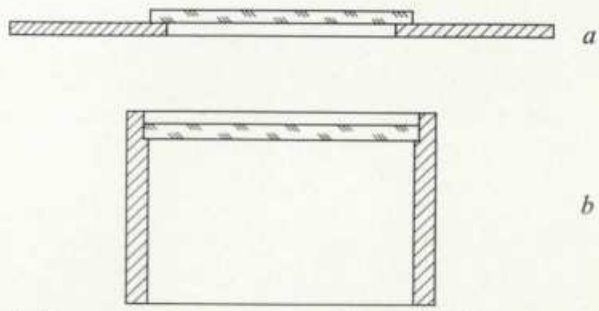


Fig. 1. Twee soorten vensteraansmeltingen. *a*) Een venster dat op een vlakke drager is aangebracht. *b*) Venster dat in een nauwkeurig uitgefreesde sponning is gemonteerd.

R. Legoux, medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

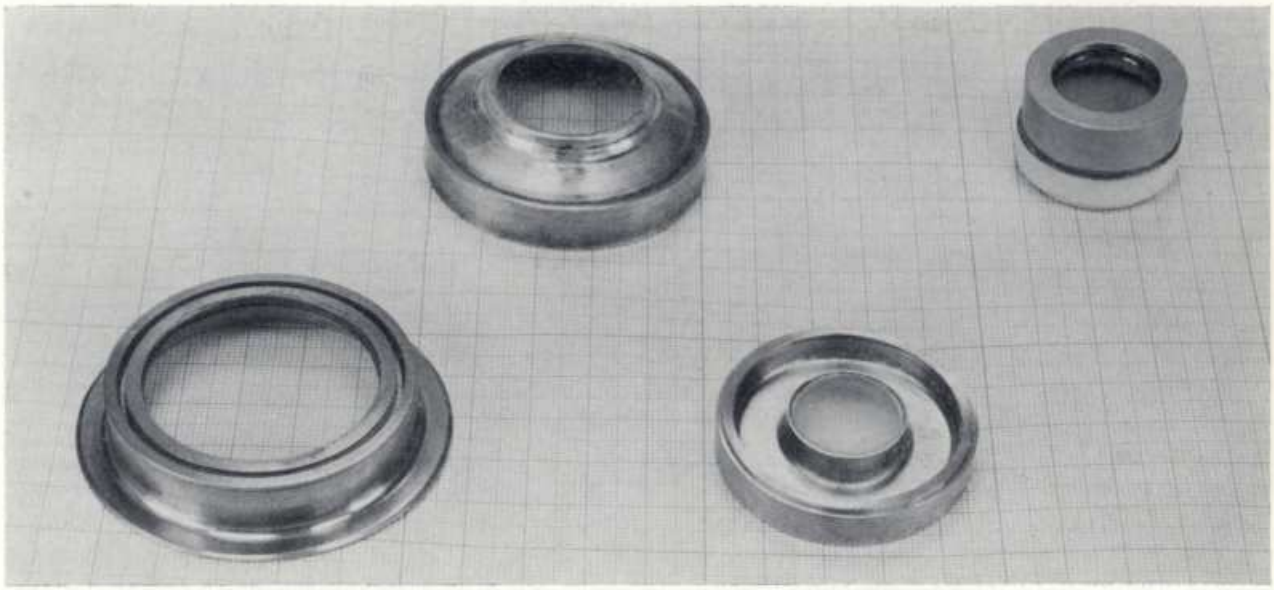


Fig. 2. Ingesmolten vensters van verschillende materialen. Van links naar rechts: saffier, CaF_2, MgO, SiO_2.

risatie van de door het venster doorgelaten straling veroorzaken.

In het ergste geval zal de ontwerper zijn toevlucht ertoe moeten nemen mede van de elastische eigenschappen van de drager gebruik te maken: hij moet deze dan een geschikte vorm geven, b.v. de rand dun laten uitlopen, zodat deze voldoende meegeven kan om binnen de toelaatbare afmetingsverschillen te blijven.

Een geschikte keuze van het soldeer, zij het een enkel metaal of een legering, blijft van het grootste belang. De keuze wordt bepaald door verschillende fysische en chemische eigenschappen van het soldeer en van de te verbinden materialen; verder door de verschillende metallurgische reacties die zich tussen het soldeer in vloeibare toestand en de te verbinden materialen afspelen, zoals het eventueel oplossen van de materialen in het soldeer, diffusie van het soldeer in deze materialen, en vorming van intermetallische verbindingen; en ten slotte door de omstandigheden van temperatuur, atmosfeer enz. waaraan het venster zal worden blootgesteld.

Uit een beschouwing van al deze factoren volgen twee hoofdvoorwaarden waaraan het soldeer moet voldoen. Ten eerste moeten zijn mechanische eigenschappen op zijn minst even goed zijn als die van de te verbinden onderdelen, ten tweede moet een goede bevochtiging van deze onderdelen worden verkregen; dit is een zeer belangrijke factor, die niet alleen van de keuze van het soldeer afhangt, maar ook van de fysisch-chemische toestand van de te verbinden gedeelten.

In het LEP zijn aansmeltmethodes voor vensters voor een zeer breed toepassingsgebied ontwikkeld. In *fig. 2* zijn enige vensters afgebeeld die met verschillende niet al te exotische materialen zijn vervaardigd. Deze aansmeltingen hebben goede mechanische eigenschappen en kunnen zonder meer de warmtebehandelingen doorstaan die men normaal op vacuümbuizen toepast. De vensters met hun drager kunnen met de gebruikelijke methodes van hard- of zachtsolderen aan de buizen of apparatuur waarvoor ze bestemd zijn worden aangesmolten.

Samenvatting. Voor buizen die elektromagnetische straling detecteren zijn veelal vensters vereist die in een zeer breed spectraal gebied ook buiten het zichtbare gebied doorlatend zijn. Daar glas een beperkte optische doorlating heeft, moet het worden vervangen door materialen als korund, kwarts, vloeispaat, silicium, germanium enz. In het LEP zijn aansmeltmethodes voor vele van dergelijke vensters ontwikkeld. Door zo goed mogelijke aanpassing van de uitzettingscoëfficiënten hebben deze aansmeltingen goede mechanische eigenschappen en kunnen zij zonder meer de warmtebehandelingen doorstaan die bij het vervaardigen van vacuümbuizen worden toegepast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Televisieprojectie op groot formaat met een optische versterkbuis gebaseerd op het Pockels-effect

G. Marie

Voor het weergeven van televisiebeelden op een formaat vergelijkbaar met dat van een bioscoopscherm staan tot dusver alleen gecompliceerde en meestal zeer kostbare methodes ter beschikking.

In het eerste deel van dit artikel laten wij enkele voorgestelde of reeds in toepassing gebrachte methodes de revue passeren. Daarna zullen wij een systeem beschrijven dat zonder tussenregistratie werkt en waarbij gebruik gemaakt wordt van een nieuwe optische versterkbuis, gebaseerd op een elektro-optisch effect. Bijzondere voordelen van het systeem zijn dat het werken ermee zeer gemakkelijk is en dat de weergegeven beelden niet flikkeren.

Vergelijking van enkele bekende projectiesystemen

Wij zullen in dit hoofdstuk de volgende televisieprojectiesystemen beschrijven, hun voor- en nadelen vermelden en hun energierendementen vergelijken:

1) Optische versterking met tussenregistratie, d.w.z. waarbij de beelden worden opgenomen op een film, die daarna wordt geprojecteerd.
2) Rechtstreekse projectie van het fluorescentiescherm van een katodestraalbuis.
3) Optische versterking zonder tussenregistratie, waarbij de beelden worden „geschreven" hetzij door een bewegende lichtbundel (gebruik makend van een laser), hetzij door een elektronenbundel (Eidophor).

Projectie met behulp van film

Wanneer men televisiebeelden projecteert door eerst een opname op film te maken, heeft men het voordeel van een goed energierendement, waardoor op zeer groot formaat kan worden geprojecteerd (b.v. van 150 m²). Het is echter een dure methode, want er is een speciale film voor nodig, die slechts voor één opname kan worden gebruikt en waaraan men na de projectie meestal niets meer heeft. Verder brengt de methode een onvermijdelijk tijdsverschil tussen het ogenblik van ontvangst van het televisiebeeld en het tijdstip van de projectie met zich mee.

Aan dit laatste bezwaar kan men tegemoet komen door films met zeer korte ontwikkeltijd te gebruiken, b.v. de klassieke Kelvin-Hughes-film [1], of zg. vesiculaire films zoals die van Kalvar [2]. De vertraging kan dan tot minder dan 1 minuut worden gereduceerd. Wegens de hoge prijs van deze films kan men ze in de televisieprojectie voor publiek alleen toepassen voor de weergave van korte scènes. Ze worden echter wel vaak gebruikt voor tijdloepopnamen [*], b.v. bij radar.

Om de verschillende projectiesystemen met elkaar te kunnen vergelijken, zullen we het elektrisch vermogen berekenen dat per eenheid van schermoppervlak nodig is om op het scherm een topwaarde van de luminantie van 28 cd/m² te verkrijgen. Dit is de topwaarde die gemiddeld in bioscopen voorkomt.

Neemt men aan dat het scherm het licht reflecteert volgens de cosinuswet van Lambert en dat het rendement hierbij 80% is, dan is een verlichtingssterkte van 110 lux nodig. Als lichtbron gebruikt men gewoonlijk een hogedruk-xenonlamp, met een lichtrendement van 33 lumen per watt. Verdere rendementscijfers voor de installatie kan men als volgt schatten: 50% voor de condensoroptiek, 66% voor de maximale doorlating van de film en het objectief, en 50% voor het feit dat het projecteren slechts gedurende een deel van de tijd plaatsvindt. Bij invoering van deze waarden vindt men een verbruik van 20 W/m² (zie *tabel I*).

Projectie van het scherm van een katodestraalbuis

Rechtstreekse projectie van het fluorescentiescherm van een katodestraalbuis is ongetwijfeld het eerste systeem geweest waarmee men televisiebeelden met een groot lijnenaantal op groot formaat heeft kunnen weergeven [3]. De mogelijkheden zijn hierbij echter begrensd door de maximaal toelaatbare dissipatie op het fluorescentiescherm van de buis. Bij een van de systemen die het verst zijn uitgewerkt [4] gebruikt men een buis die een gemiddeld elektrisch vermogen van 25 W kan dissiperen. Het fluorescentiescherm van de buis straalt volgens de cosinuswet van Lambert, met een lichtrendement van 8 lm/W. De toegepaste

G. Marie, ingénieur E.N.S.T., Dr. Ing., medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

projectie-optiek met grote opening (Schmidt-optiek) heeft een rendement van de orde van grootte van 25%. Om in rekening te brengen dat het elektrisch energieverbruik slechts evenredig is met de *gemiddelde* luminantie van het beeld, die in het algemeen ongeveer 1/3 is van de topwaarde, kunnen we een factor 3 invoeren als „modulatierendement" (zie tabel I). Voor een luminantie van het scherm van 28 cd/m² vindt men dan een energieverbruik van 18 W/m². Bij de hierboven als voorbeeld genoemde beperking van de toelaatbare dissipatie in de buis tot 25 W kan men derhalve slechts beelden projecteren op een formaat van enkele m². Men heeft echter met een opstelling met drie buizen en drie projectie-objectieven overwegen om beelden van goede kwaliteit te verkrijgen. De modulatie van de lichtbundel kan gemakkelijk teweeg worden gebracht door middel van een Kerr-cel of een Pockels-cel. Wat de afbuiging betreft, komt in aanmerking hetzij een digitale afbuiging, hetzij een continue afbuiging door ultrasone golven of door draaiende of trillende spiegels [5].

Welk energieverbruik heeft dit systeem? Als bron kiezen wij de continu werkende laser met geïoniseerd argon; deze heeft van alle lasers die zichtbare straling leveren het hoogste rendement en het grootste vermogen. Plaatst men de gaskolom van deze laser in een sterk magnetisch veld, van meer dan 0,1 tesla (1000 gauss), dan kan het rendement η een waarde

Tabel I. Energieverbruik van verschillende projectiesystemen, berekend voor een luminantie van het scherm (topwaarde) van 28 cd/m² (verlichtingssterkte 110 lux).

	Lichtrendement van de bron (lm/W)	Rendementen			Energieverbruik (W/m²)	
		optiek	modulatie	aftasting	zwart-wit	kleur
Katodestraalbuis	8	0,25	3	1	18	50
Bioscoop (met xenon-lamp)	33	0,5	0,66	0,5	20	20
Eidophor (met xenon-lamp)	33	0,5	0,5×0,5	0,5	53	80
Laser (geïoniseerd argon)	0,2	1	0,75	0,8×0,92	1000	2000
TITUS-buis (met xenon-lamp)	33	0,25	0,5×0,75 ×(0,8)²	1	55	80

en door gebruik van een scherm met gerichte reflexie (versterkingsfactor ongeveer 3) kleurenbeelden met een helderheid van 20 cd/m² op een oppervlak van 7 m² kunnen projecteren [4]. Natuurlijk gaat het gebruik van een scherm met gerichte reflexie ten koste van de nuttige oppervlakte waarop toeschouwers geplaatst kunnen worden.

Optische versterking met schrijvende laserbundel

Reeds bij de eerste proeven op televisiegebied heeft men systemen met schrijvende lichtbundels gebruikt. Een door een lichtbron uitgezonden bundel werd toen in intensiteit gemoduleerd met een Kerr-cel en daarna door een stelsel van draaiende spiegels op het scherm geworpen. Men kon hiermee echter geen goede beelden van flink formaat produceren, want de modulator en de deflectors konden slechts lichtbundels met beperkte doorsnede verwerken.

Door de komst van de laser, die van nature een uiterst nauwe bundel uitstraalt (b.v. met een diameter van 1 mm en een divergentie van 10^{-3} rad), kan men thans opnieuw het gebruik van een dergelijk systeem van 10^{-3} bereiken [6]. Hieronder geven wij de waarden van η en van de effectieve ooggevoeligheidsfactor $\bar{y}$ als functie van de golflengte λ van de uitgezonden spectrumlijnen:

λ (nm)	η	$\bar{y}$
488,0	$5,5\times10^{-4}$	0,18
514,5	3×10^{-4}	0,60
498,7	$0,8\times10^{-4}$	0,28
476,5	$0,7\times10^{-4}$	0,12

[*] De meer gebruikelijke Nederlandse term „vertraagde film" zou hier wel bijzonder verwarrend zijn.

[1] L. Corben, R. Lindstrom, A. Shepp en S. Hersh, in: Unconventional photographic systems, SPSE Symp. Washington D.C. 1964, blz. 166-168.
[2] R. T. Nieset en N. T. Notley, J. SMPTE **74**, 786-788, 1965.
[3] P. M. van Alphen en H. Rinia, Philips techn. T. **10**, 97-106, 1948.
[4] T. Poorter en F. W. de Vrijer, Philips techn. T. **19**, 353-370, 1957.
[5] S. M. Stone, 8th Nat. Symp. on Information display, San Francisco 1967, blz. 161-168.
[6] E. F. Labuda, E. I. Gordon en R. C. Miller, IEEE J. Quantum Electronics **QE-1**, 273-279, 1965.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Daar de waarde $\bar{y} = 1$ overeenkomt met een lichtrendement van 680 lm/W, levert de optelling van de bijdragen van de verschillende spectrumlijnen een totaal lichtrendement van 0,20 lm/W. Men moet bovendien nog rekening houden met het rendement van de modulator (ongeveer 75%), en verder met de onderbrekingen door het terugspringen van de schrijvende bundel: bij het systeem met 625 lijnen heeft men een nuttige fractie van de projectietijd van $0{,}8 \times 0{,}92$ (20% verlies wegens de lijnterugslag en 8% wegens de beeldterugslag). Het energieverbruik dat nodig is om een luminantie van 28 cd/m² te verkrijgen (zie tabel I) bedraagt dan 1000 W/m².

Het rendement van dit systeem is dus veel te laag voor projectie op groot formaat. Voor kleurenprojectie zou men de laser met geïoniseerd argon kunnen gebruiken voor het groen (514,5 nm) en voor het blauw (476,5 nm en desnoods ook 488,0 nm), en de He-Ne-laser voor het rood (632,8 nm; rendement ongeveer 3×10^{-4}). Men vindt dan dat het energieverbruik van de orde van grootte 2000 W/m² wordt, d.i. honderd maal hoger dan bij het projectiesysteem met film.

Optische versterking met schrijvende elektronenbundel in de Eidophor

Het principe van de Eidophor is reeds in 1939 voorgesteld door F. Fischer. In 1944 zijn de eerste ervaringen ermee opgedaan, en omstreeks 1950 was het systeem geschikt voor praktisch gebruik [7][8].

Het principe is weergegeven in *fig. 1*. Het door een bioscoopprojectielamp *A* uitgestraalde licht wordt geworpen op een traliespiegel *B*, geplaatst in het kromtemiddelpunt van een holle spiegel *C* die bedekt is met een oliehuidje *D*. Als dit huidje volkomen effen is, geeft de holle spiegel een beeld van het tralie van spiegel *B* dat samenvalt met het tralie zelf. Al het licht dat de spiegel *C* bereikt wordt dan teruggekaatst naar de lichtbron. Wordt echter het oliehuidje gedeformeerd, dan valt een deel van het door *C* gereflecteerde licht op de spleten van *B* en bereikt de projectielens *F*. Een deformatie van het oliehuidje wordt teweeggebracht door een plaatselijk in dichtheid variërende elektrische lading, aangebracht met behulp van een elektronenbundel waarvan de intensiteit met hoge frequentie (b.v. van de orde van 10 MHz) kan worden gevarieerd. Laat men de intensiteit van de elektronenbundel moduleren door het videosignaal, dan kan men op deze manier een televisiebeeld projecteren, waarvan de luminantie nu alleen zal afhangen van die van de lichtbron *A*, en niet van het vermogen dat de schrijvende elektronenbundel kan leveren. Het uitwissen van elk beeld gebeurt automatisch met een geschikte tijdconstante dank zij een goed gekozen compromis tussen het geleidingsvermogen en de viscositeit van het oliehuidje. Dit moet hiertoe nauwkeurig op een bepaalde temperatuur worden gehouden. Aan dit systeem is inherent dat het beeld flikkert, evenals bij de klassieke katodestraalbuis en bij het projectiesysteem met een laser. Om blijvende vervormingen van het oliehuidje te voorkomen, moet men de

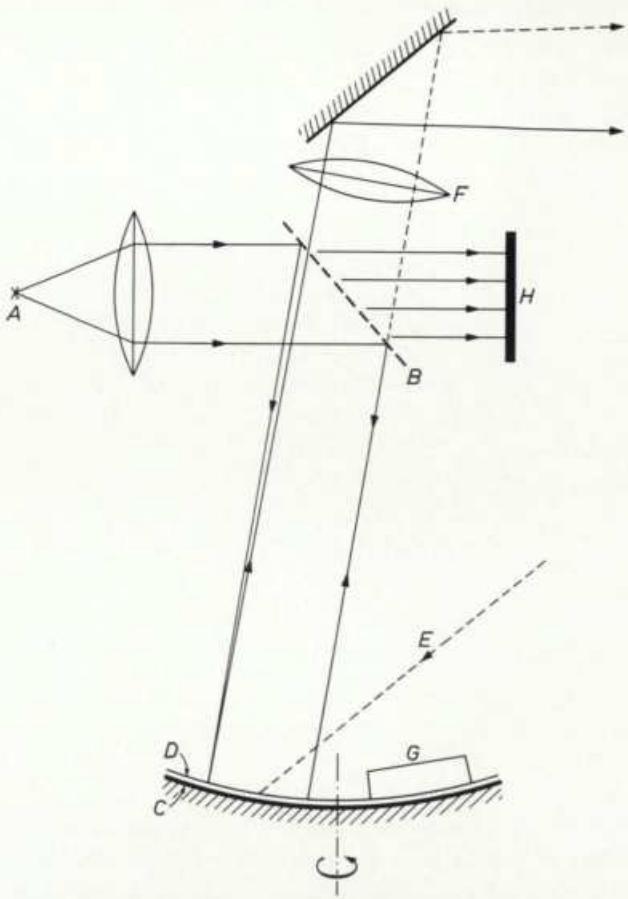


Fig. 1. Principe van de optische versterking met het Eidophorsysteem. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de vervorming van een oliehuidje onder invloed van elektrische ladingen die erop worden aangebracht door een elektronenbundel. *A* lichtbron. *B* traliespiegel. *C* holle spiegel. *D* oliehuidje. *E* elektronenbundel. *F* projectielens. *G* schraper die het oliehuidje op de langzaam ronddraaiende spiegel *C* gladstrijkt. Het van *A* komende licht dat niet door de traliespiegel *B* wordt gereflecteerd, wordt volledig geabsorbeerd in *H*.

holle spiegel langzaam laten ronddraaien en het oliehuidje met een schraper (*G* in fig. 1) gladstrijken.

Om het energieverbruik te berekenen, nemen we aan dat bij dit systeem dezelfde lichtbron en dezelfde collectoroptiek gebruikt worden als bij filmprojectie. Men moet er dan rekening mee houden dat de traliespiegel *B* slechts 50% van het door de bron uitgestraalde licht nuttig reflecteert [9] en dat op de terugweg weer maximaal 50% van het door het oliehuidje weerkaatste licht door de spleten van *B* wordt door-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gelaten. Het exponentieel uitsterven van de vervorming van het oliehuidje, dat nodig is om bewegende beelden te kunnen weergeven, kan men globaal in rekening brengen door te stellen dat het projecteren slechts gedurende 50% van de tijd plaatsvindt. Om een luminantie van 28 cd/m² te krijgen, is dan een vermogen van 53 W/m² nodig (tabel I).

Voor het projecteren van televisiebeelden in kleur volgens dit principe heeft men een drievoudige projector geconstrueerd. Hierbij zijn aan de opstelling van fig. 1 nog twee elektronenkanonnen toegevoegd, en de drie elektronenbundels, bestuurd door de drie kleurensignalen rood, groen en blauw, vallen op drie verschillende gedeelten van de holle spiegel *C*. Tussen de traliespiegel *B* en de holle spiegel zijn kleurscheidende spiegels geplaatst, die de invallende lichtbundel in de drie grondkleuren splitsen en deze op de bijbehorende delen van *C* richten. Ten slotte worden door deze zelfde spiegels de gereflecteerde lichtbundels weer verenigd. In de praktijk is het energieverbruik van deze opstelling 1,5 à 2 maal zo groot als dat van het zwart-wit-systeem (tabel I).

De Eidophor is tegenwoordig het enige zonder tussenregistratie werkende optische versterkingssysteem waarmee televisiebeelden kunnen worden geprojecteerd op een formaat van enkele tientallen m². Wel wordt het flikkeren erger naarmate men het formaat groter kiest. Andere bezwaren zijn dat de apparatuur kostbaar en volumineus is en dat het werken ermee niet eenvoudig is. Men moet nl. geregeld de katodes verwisselen — de installatie moet daarvoor in het algemeen demontabel zijn —, daar hun levensduur beperkt is ten gevolge van de aanwezigheid van een geringe dampdruk van olie; met het oog hierop moet de installatie ook een pompsysteem bevatten. Bovendien werkt het apparaat met draaiende delen en met koelorganen in vacuüm. Momenteel wordt eraan gewerkt om het apparaat in afgesmolten vorm te kunnen maken. De grote afmetingen en de gecompliceerdheid van het geheel maken het echter begrijpelijk dat in verschillende laboratoria getracht wordt kleinere toestellen te maken, die berusten op andere fysische verschijnselen, met name op elektro-optische effecten.

Optische versterking met behulp van het Pockels-effect

Principe

Bij de nu te beschrijven optische versterker wordt de lichtstraal gemoduleerd door het longitudinale elektro-optische Pockels-effect, dat optreedt in een monokristalplaatje van kaliumhydrofosfaat of een verwante verbinding. Het idee om het Pockels-effect voor het projecteren van televisiebeelden te gebruiken is niet nieuw. Een voorstel in die richting werd reeds in 1936 gedaan door Kaysie [10] en later door Von Ardenne [11] en Babits [12]. Een poging om het idee te realiseren werd in 1960 beschreven door Rissmann en Vosahlo [13], en er wordt thans in verschillende Amerikaanse laboratoria aan dit onderwerp gewerkt. Voor zover wij weten, gebruikt men hierbij kristallen op kamertemperatuur en is men er nog niet in geslaagd een optische versterker te realiseren waarmee beelden met een groot lijnenaantal geprojecteerd kunnen worden.

Plaatst men een kristal van KH_2PO_4 in een elektrisch veld dat evenwijdig is gericht met de optische as, dan veroorzaakt het veld een verschil Δn in brekingsindex voor componenten van het licht met onderling loodrechte polarisatierichtingen. Deze componenten, die aanvankelijk in faze zijn, hebben als zij uit het kristal (dikte l) treden een fazeverschil φ. Het effect is lineair, dat wil zeggen Δn is evenredig met de veldsterkte E, en φ is evenredig met het produkt El, dus met het potentiaalverschil V tussen het ingangs- en het uitgangsvlak van het kristal. Wordt het kristal tussen twee gekruiste polarisators geplaatst, dan is de resulterende doorlating:

$$\tau = \sin^2 \tfrac{1}{2}\varphi = \sin^2 kV. \quad . \; . \; . \; . \quad (1)$$

De in deze uitdrukking voorkomende parameter k is onafhankelijk van de dikte van het kristalplaatje. Zolang τ kleiner is dan 75%, is deze karakteristiek vrijwel kwadratisch, dat wil zeggen analoog met die van de klassieke beeldbuizen.

De gevoeligheid van een kristal kan worden uitgedrukt door de spanning waarbij de fazeverschuiving 180° bedraagt en waarbij derhalve de doorlating maximaal is. Deze spanning bedraagt voor normaal kaliumdihydrofosfaat ongeveer 8 kV, en ongeveer 3,5 kV voor een kristal waarbij de gewone waterstof is vervangen door zware waterstof (KD_2PO_4). Laat men het kristal tweemaal door het licht doorlopen, terwijl men, om in het kwadratische gebied te blijven, de doorlating beperkt tot 75%, dan wordt de vereiste maximale spanning voor KD_2PO_4 verlaagd tot

[7] E. Baumann, J. Brit. Instn. Radio Engrs. **12**, 69-78, 1952.
[8] E. I. Sponable, J. SMPTE **60**, 337-343, 1953.
[9] In de tegenwoordige uitvoering is voor de traliespiegel een soort jaloezie-constructie toegepast, waardoor een factor 2 in het modulatierendement kan worden gewonnen. Bij projectie op groot formaat blijft het energieverbruik vrijwel even groot als in tabel I aangegeven, daar de grotere schijnbare afmetingen van de lichtbron een geringer rendement van de optiek met zich meebrengen.
[10] L. S. Kaysie, in: Television and Short-Wave World, mei 1936.
[11] M. von Ardenne, Telegraphen-, Fernsprech-, Funk- und Fernseh-Technik **28**, 180-184, 1939.
[12] V. A. Babits, Television Engineering, textbook, Rensselaer Polytechnic Institute.
[13] S. Rissmann en H. Vosahlo, Jenaer Jahrb. 1960/I, 228-244.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

1,2 kV. Wil men met een kristalplaatje van b.v. 30×40 mm een scheidend vermogen bereiken van 600 lijnen, met 800 punten per lijn, dan moet op twee punten met onderlinge afstand van 50 μm een potentiaalverschil van ongeveer 1 kV kunnen bestaan. Dit heeft men blijkbaar nog niet kunnen verwezenlijken, hetzij doordat aan het oppervlak van het kristal lekstromen optreden, hetzij door de invloed die de elektronenbanen, zelfs bij zeer hoge versnellingsspanningen (b.v. 20 kV), van dergelijke potentiaalverschillen ondervinden.

De TITUS-buis

In het LEP is op basis van het Pockels-effect een speciale buis ontwikkeld, de TITUS-buis (van „Tube Image à Transparence Variable Spatio-temporelle"). Over de grondgedachten hiervan, die in samenwerking met prof. Y. Angel van het Conservatoire des Arts et Métiers en R. Genève van het LEP zijn uitgewerkt, is reeds twee jaar geleden een publikatie verschenen [14]. We zullen deze buis nu beschrijven.

Gaat men na hoe het Pockels-effect met de temperatuur varieert, dan vindt men dat de geïnduceerde dubbele breking, indien men boven het Curie-punt werkt, niet evenredig is met de elektrische veldsterkte, maar met de elektrische polarisatie, dat wil zeggen met het produkt $\varepsilon \times E$. Dank zij het feit dat KD_2PO_4 en verwante kristallen ferro-elektrisch zijn, hebben wij de eerder genoemde moeilijkheden kunnen oplossen door het kristal vlak bij de Curie-temperatuur t_C te laten werken. In *fig. 2* is als functie van de temperatuur uitgezet de diëlektrische constante van KD_2PO_4 voor een veld loodrecht op de optische as (ε_a) en parallel met deze as, waarbij in dit laatste geval nog verschil moet worden gemaakt tussen een vrij beweeglijk kristal (ε_c) en een ingeklemd kristal (ε_c'). Het Pockels-effect in een vrij beweeglijk kristal gaat nl. vergezeld van een piëzo-elektrisch effect, waardoor een koppeling kan ontstaan tussen verschillende punten van het beeld. Het is daarom nodig het kristalplaatje onbeweeglijk te bevestigen, b.v. door het vast te plakken. Men vindt dan dat de constante ε_c' bij een temperatuur in de nabijheid van t_C een maximale waarde van 650 bereikt en dat bij lagere temperatuur geen splitsing in domeinen optreedt. De werktemperatuur mag daardoor in een vrij groot gebied variëren, b.v. van $t_C - 4$ °C tot $t_C + 2$ °C, waardoor de stabilisatie van de temperatuur betrekkelijk gemakkelijk is. Dank zij de zeer hoge waarde van ε kan men nu, bij een kristal dat tweemaal door de lichtbundel wordt doorlopen, voor het moduleren van het licht volstaan met een maximaal potentiaalverschil van 80 V [15]. Verder vindt men dat ε_a ongeveer 10× kleiner is dan ε_c'; hierdoor kan men zonder verlies aan beeldscherpte de dikte van de trefplaat groter maken dan de afstand tussen twee beeldelementen.

Dank zij de genoemde keuze van de werktemperatuur wordt niet alleen de gevoeligheid van het Pockels-effect zoveel gunstiger, maar tevens kan men nu de optische versterker een zeer belangrijke eigenschap geven: hij kan geheel flikkervrije televisiebeelden

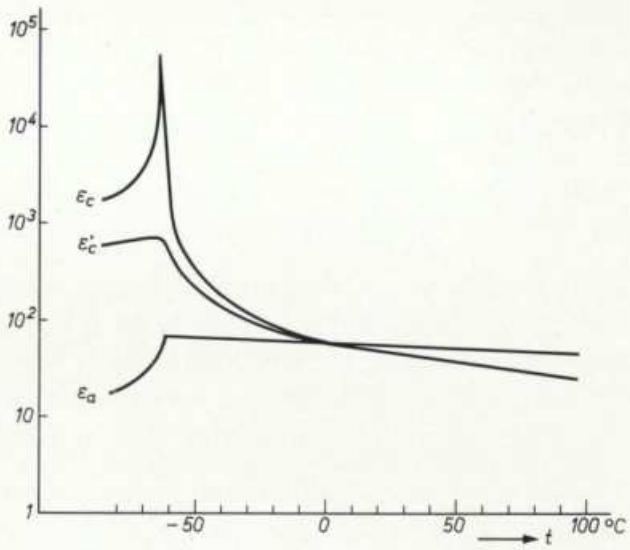


Fig. 2. Als functie van de temperatuur t is uitgezet de diëlektrische constante van een KH_2PO_4-kristal, waarin de waterstof H voor 90 % is vervangen door zware waterstof D. De drie krommen geven de genoemde constante voor een veld resp. in een richting loodrecht op de optische as (ε_a) en een richting evenwijdig met de optische as, waarbij nog verschil bestaat tussen een vrij beweeglijk kristal (ε_c) en een ingeklemd kristal (ε_c').

leveren, hoe langzaam de aftasting ook plaats vindt. De tijdconstante waarmee het kristal wordt ontladen (gelijk aan het produkt van de diëlektrische constante en de soortelijke weerstand) bereikt nl. bij −60 °C ongeveer de waarde van een uur, terwijl hij bij kamertemperatuur ongeveer 0,1 s is. Anderzijds ontstaat hierdoor een nieuw probleem: terwijl het uitwissen van het beeld generlei voorzieningen vraagt als men bij kamertemperatuur werkt, zijn in ons geval speciale maatregelen nodig om de ladingen die door de elektronenbundel zijn aangebracht weer af te voeren. Wij bereiken dit door gebruik te maken van de secundaire emissie van de trefplaat, op een manier die ook in sommige geheugenbuizen wordt toegepast. Hoe dit gebeurt, ziet men in *fig. 3*, waarin tevens de gehele opstelling is geschetst. Dank zij een op het kristal opgedampte dunnelaagjesspiegel M wordt het kristal tweemaal door de lichtbundel doorlopen. Het als trefplaat fungerende geheel wordt afgetast door een elektronenbundel met een versnellingsspanning van ongeveer 500 à 1000 V; de secundaire-emissiecoëfficiënt van het gebombardeerde oppervlak

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft dan bij verzadiging een waarde groter dan 1. Op een kleine afstand, van de orde van 50 μm, is een rooster *G* voor de trefplaat geplaatst. In deze situatie bereikt een punt dat door de elektronenbundel wordt getroffen een eindpotentiaal die enkele volts hoger is dan die van het rooster. De elektronenbundel, die een constante sterkte heeft, werkt dan vrijwel als een bewegende kortsluiting tussen het rooster en het punt waar de plaat getroffen wordt. Men behoeft dus slechts het stuursignaal tussen het rooster *G* en de transparante geleidende laag *E* aan te leggen en bereikt daarmee dat elk punt van de trefplaat op het ogenblik dat de elektronenbundel dit passeert tot de dan aanwezige videospanning wordt geladen. Het wissen en schrijven gebeurt dus gelijktijdig, en hierdoor treedt in het geheel geen flikkeren op: de lading van ieder punt blijft immers tussen opeenvolgende aftastingen door de elektronenbundel constant, en ook bij het passeren van de bundel verandert de lading niet als de luminantie van het beeld op dit punt sinds de vorige passage niet is veranderd.

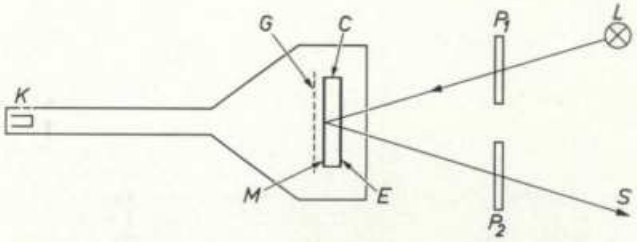


Fig. 3. Constructie van de TITUS-buis, schematisch. De katode *K*, die zich op een potentiaal tussen —500 en —1000 V bevindt, levert een elektronenbundel met constante sterkte. *C* monokristallijn plaatje van KD_2PO_4, dat het Pockels-effect vertoont (een van de longitudinale elektrische veldsterkte afhangende dubbele breking). *M* dunnelaagjesspiegel. Vlak bij het kristalplaatje is een roostervormige collectorelektrode *G* aangebracht, die zich op aardpotentiaal bevindt. *E* geleidende transparante elektrode, waaraan het videosignaal wordt toegevoerd. De elektronenbundel werkt vrijwel als een bewegende kortsluiting tussen het rooster en de trefplaat. *L* lichtbron. P_1 en P_2 gekruiste polarisators; het licht wordt geprojecteerd op een scherm *S*.

Energieverbruik van het projectiesysteem

Volgens verg. (1) zou het KD_2PO_4-kristal, geplaatst tussen gekruiste polarisators, bij spanning nul in het geheel geen licht moeten doorlaten. Daar KD_2PO_4 in het tetragonale stelsel kristalliseert en dus een optische as heeft, geldt het bovenstaande echter alleen streng voor lichtstralen die evenwijdig met de optische as lopen. Als men werkt met een enigszins divergerende lichtbundel, krijgt men een parasitaire doorlating, waardoor het contrast wordt verminderd. Men kan berekenen dat met een 0,2 mm dik kristalplaatje dat tweemaal door het licht wordt doorlopen, en met een bundel waarvan de openingshoek 10° is, een contrast van 50 kan worden bereikt. De lichtbundel die men kan gebruiken is dus meer beperkt van afmetingen dan bij de filmprojectie. Gebruikt men als lichtbron een xenon-booglamp, die een lichtopbrengst heeft van 33 lm/W, en een trefplaat met een oppervlakte van 30×40 mm, dan wordt het rendement van de optiek verminderd tot ongeveer 25%. Verder moet men rekening houden met de volgende factoren:

a) Doordat men met gepolariseerd licht werkt, ontstaat een lichtverlies van 50% (of nog meer als de polariserende prisma's niet verliesvrij zijn).
b) Als men in het kwadratische gedeelte van de modulatiekarakteristiek wil blijven, is, zoals bij verg. (1) werd vermeld, de doorlating beperkt tot 75%.
c) De transparante elektrode *E*, die tweemaal door de bundel wordt doorlopen, veroorzaakt een lichtverlies; de resulterende doorlating hiervan is 80%.

Voor een verlichting van het scherm van 110 lux (zie tabel I) komt men zodoende tot een verbruik van 55 W/m², een waarde die zeer dicht bij die van de Eidophor ligt. Evenals daar wordt dit verbruik nog een factor 1,5 tot 2 groter voor het projecteren van kleurenbeelden. Dit laatste kan op zeer eenvoudige wijze gebeuren met behulp van drie van de beschreven buizen en twee kleurscheidende spiegels, zoals met stippellijnen in fig. 5 is aangegeven.

Tot dusver bereikte resultaten

Voor de experimentele uitvoering van de optische versterkbuis moesten diverse technologische problemen worden opgelost, met name wat betreft het werken met gepolariseerd licht en de vereiste gelijkmatige koeling van de trefplaat tot een temperatuur van —60 °C. Bij de oplossing van deze problemen hebben J. Donjon en R. Le Pape van dit laboratorium meegewerkt. *Fig. 4* toont een buis die, om normale afbuig- en focusseerspoelen te kunnen gebruiken, in de afmetingen van een drie-inch-beeldorthicon werd vervaardigd. De trefplaat is voorzien van een tweetrapskoeling met Peltier-elementen, die in de buis zijn aangebracht.

De volledige opstelling is geschetst in *fig. 5*. Het licht van een xenonlamp wordt met behulp van een holle spiegel geconcentreerd op een polarisatiescheidingsprisma van kalkspaat volgens Glazebrook. Dit prisma laat alleen dat deel van het licht naar de buis door waarvan de elektrische vector *evenwijdig* is met het vlak van tekening. De projectielens bevindt

[14] G. Marie, Philips Res. Repts. **22**, 110-132, 1967.
[15] Hierbij is geen rekening gehouden met de capacitieve spanningsdeling die optreedt door de aanwezigheid van diëlektrische laagjes op de eindvlakken van het kristal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

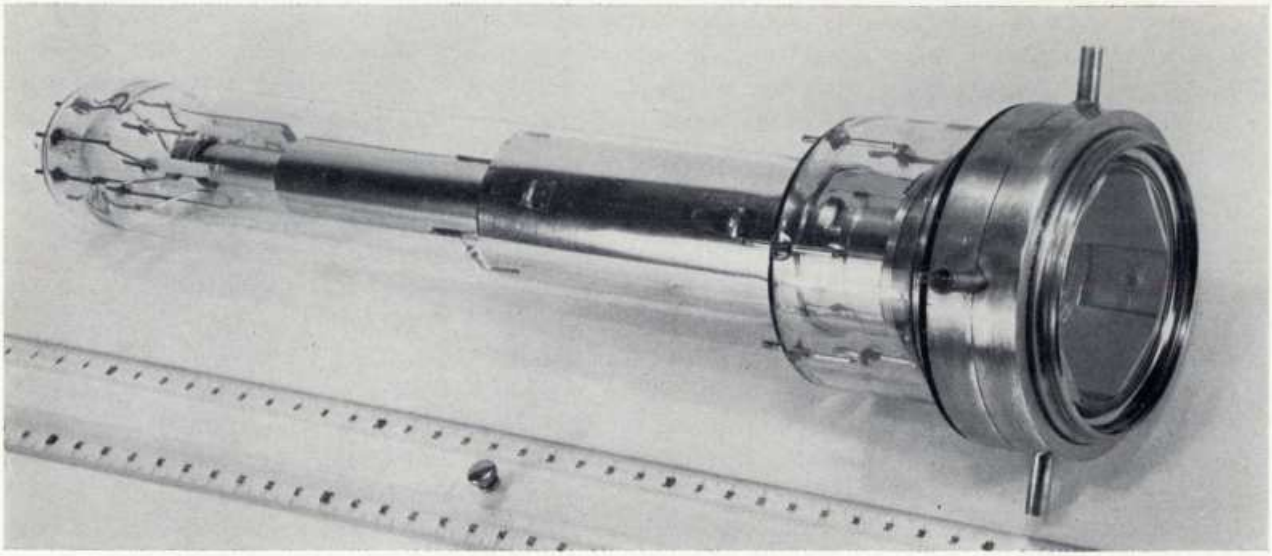


Fig. 4. Experimentele uitvoering van de TITUS-buis. In de buis is een tweetraps-koelsysteem met Peltier-elementen aangebracht, dat gedeeltelijk door het venster zichtbaar is.

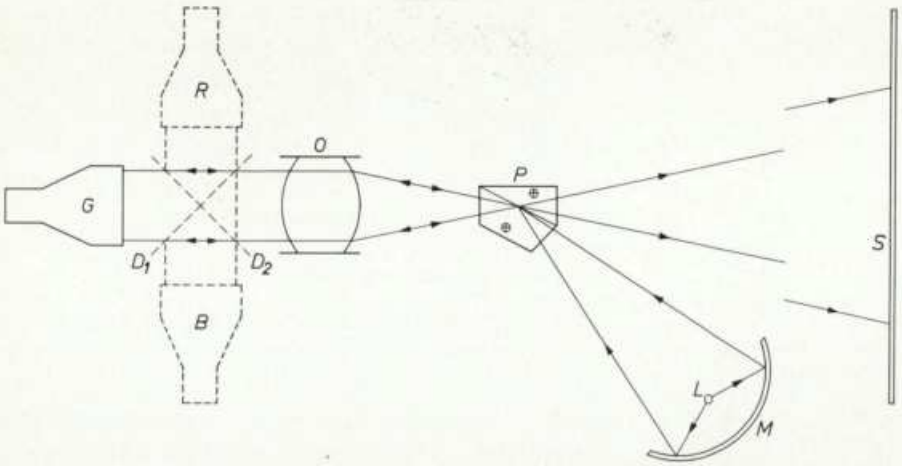


Fig. 5. Projectiesysteem met TITUS-buis voor zwart-wit-televisie (getrokken lijnen). Met stippellijnen is de extra-apparatuur aangegeven waarmee de opstelling zonder meer te gebruiken is voor kleurentelevisie. *R*, *G* en *B* drie identieke TITUS-buizen voor de kleuren rood, groen en blauw. D_1 en D_2 kleurscheidende spiegels. *O* objectief. *P* polarisatie-scheidingsprisma. *L* projectielamp. *M* holle spiegel. *S* projectiescherm.

zich tussen het prisma en de buis, zodat de lichtstralen gemiddeld loodrecht op de trefplaat vallen. Wanneer de lichtbundel na reflexie aan de trefplaat weer de lens en het prisma passeert, wordt alleen het deel van het licht waarvan de elektrische vector *loodrecht* staat op het vlak van tekening doorgelaten naar het scherm.

Bij de eerste proeven in het laboratorium werd een beeld op een formaat van ongeveer een vierkante meter geprojecteerd (*fig. 6*). De scherpte (750 beeldelementen per lijn) en het contrast zijn bevredigend, zoals in fig. 6 is te zien.

Voordelen en toepassingen

De beschreven optische versterkbuis is een relatief simpele afgesmolten buis van geringe afmetingen. Vergeleken met bestaande apparaten volgens het Eidophor-principe is het werken met de buis zeer eenvoudig. Verder treedt bij deze buis geen flikkeren op, wat bij het projecteren op groot formaat bijzonder belangrijk is. Bij professioneel gebruik zou hierdoor de vereiste bandbreedte van het televisiekanaal met ongeveer een factor 2 kunnen worden verkleind.

De toepassing van deze optische versterkbuis is niet beperkt tot de gewone televisie. Door de afwezigheid van flikkeren is de buis ook bijzonder geschikt voor het weergeven van beelden met lage herhalingsfrequentie, waarmee men te maken heeft bij infrarood-televisie, waar het aftasten met mechanische middelen gebeurt (b.v. één beeld per seconde), en bij radar (enkele beelden per minuut). Geheel andere toepassingsmogelijkheden ontstaan voorts door het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geheugen dat de buis bezit (hij kan beelden onthouden gedurende een tijd van de orde van een uur) en door het feit dat op elk gewenst punt van het beeld informatie tegelijk uitgewist en ingeschreven kan worden: dit zou de buis een plaats kunnen verschaffen in de randapparatuur voor computers.

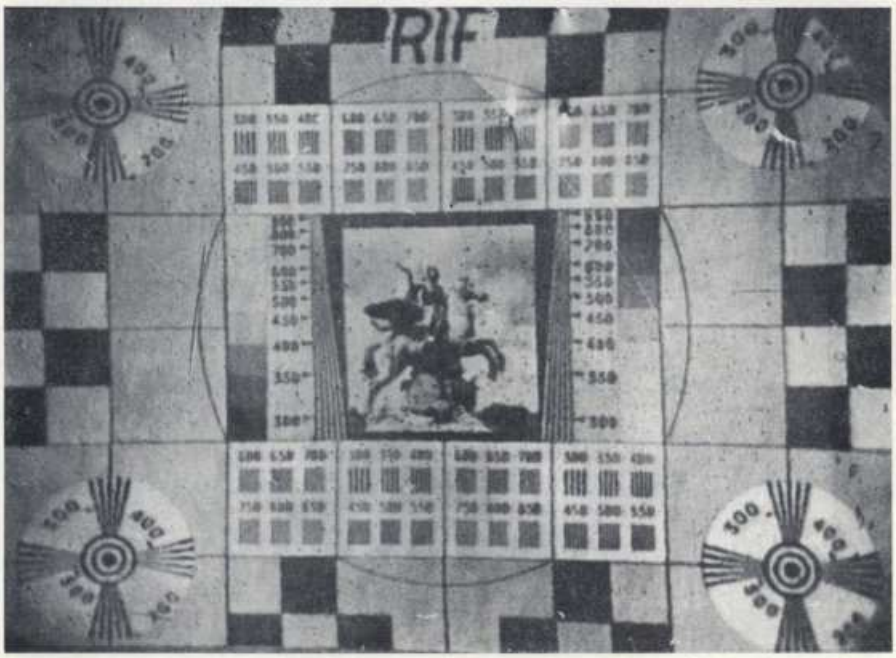


Fig. 6. Beeld dat werd geprojecteerd op een formaat van ongeveer 1 m². Door het drukprocédé komt het scheidend vermogen van de buis in de reproduktie niet volledig tot zijn recht. Dit scheidend vermogen is in werkelijkheid 750 beeldelementen per lijn.

Samenvatting. Na een beschouwing van de problemen die bij televisieprojectie op groot formaat optreden laat de auteur verschillende tot dusver bekende systemen de revue passeren: tussenregistratie op film, projectie van het fluorescentiescherm van een katodestraalbuis, het gebruik van lasers, en de Eidophor. De laatste is het enige optische versterkingssysteem zonder tussenregistratie dat tot dusver in praktijk is gebracht, hoewel het behept is met het nadeel van een zeer volumineuze en gecompliceerde apparatuur. Eenvoudiger oplossingen zijn mogelijk door gebruik van een nieuw soort optische versterkbuis, waarbij het Pockels-effect van een KD_2PO_4-kristal wordt toegepast. Verschillende varianten hiervan worden thans in Europa en de V.S. onderzocht. In het LEP is een buis op deze grondslag uitgewerkt waarbij men het kristal op zijn Curie-temperatuur (−60 °C) laat werken. Deze zg. TITUS-buis heeft de essentiële eigenschap dat men geheel flikkervrije beelden verkrijgt. De eerste proeven hiermee hebben aangetoond dat scherpte en contrast van de verkregen beelden bevredigend zijn.

Een installatie voor televisiereportages met draagbare camera's

J. Cayzac

De Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée hebben in 1960 in nauwe samenwerking met de Franse radio- en televisie-organisatie, de O.R.T.F., een draagbare televisie-uitrusting ontwikkeld die bestond uit een geheel onafhankelijk werkende ultrakortegolfzender en een lichte camera.

Op grond van ervaringen, door de O.R.T.F. met deze uitrusting opgedaan, is thans een tweede, verder uitgewerkt, systeem ontwikkeld dat verscheidene mobiele cameraposten omvat en een centraal gedeelte dat in een

J. Cayzac, medewerker van Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

reportagewagen wordt geplaatst. Met uitzondering van het antennesysteem wordt de gehele installatie thans vervaardigd door de Société Télécommunications Radioélectriques et Téléphoniques (T.R.T.). Van de eerstgenoemde apparatuur verschilt de nieuwe in hoofdzaak op de volgende punten:

1) Bij een aanzienlijk deel van de toepassingen wil men de camera alléén gebruiken; zij wordt dan via een coaxiale kabel verbonden met een videobandopnemer of een reportagewagen. Voor dit doel is de nieuwe camera, ook wat betreft de voeding, geheel onafhankelijk gemaakt. Uiteraard wordt het gewicht van het geheel dan een probleem. Door vrijwel uitsluitend geïntegreerde schakelingen te gebruiken, is bereikt dat de nieuwe camera niet meer dan 7 kg weegt.

2) Om een gebeurtenis tegelijkertijd van verschillende zijden te kunnen verslaan, moeten verscheidene draagbare camera-eenheden tegelijk worden gebruikt en men moet in staat zijn beelden te superponeren. De tijdbases van alle camera-eenheden moeten dan onderling gesynchroniseerd zijn. Hiertoe hebben wij een „intersynchronisatie"-inrichting ontwikkeld, die de tijdbasisgeneratoren van de verschillende eenheden synchroniseert met de generator van het verzamelcentrum.

3) Bij uitgebreide reportages staan de mobiele cameraeenheden door straalzenders in verbinding met het verzamelcentrum. Door reflexies kunnen dan vervormingen van het signaal ontstaan, die vooral merkbaar worden als een mobiele eenheid zich verplaatst. Een verbetering in de weergave is bereikt door een inrichting waardoor de antennes automatisch goed op het verzamelstation gericht blijven.

De genoemde straalzenderverbinding werkt op een frequentieband in de buurt van 1500 MHz. Het centrale gedeelte aan boord van de reportagewagen ontvangt de videosignalen en levert de correctiesignalen die vereist zijn voor de synchronisatie van de verschillende mobiele eenheden. De signalen voor het automatisch richten van de antennes en de synchronisatiesignalen worden van de reportagewagen naar de mobiele eenheden overgebracht via een draadloze multiplexverbinding die in de buurt van 32 MHz werkt.

De gefabriceerde nieuwe installatie omvat drie mobiele eenheden en een driekanaalsinstallatie voor de reportagewagen ter synchronisatie van de mobiele eenheden.

Iedere mobiele eenheid omvat de volgende vier onafhankelijke gedeelten: de camera, de 1500-MHz-zender, de intersynchronisatie-eenheid, en het richtapparaat voor de antenne met daar bovenop de richtantenne zelf. De laatstgenoemde drie eenheden kunnen in een draagstel op de rug worden gedragen, terwijl de camera, via een kabel met deze uitrusting verbonden, op de schouder van de cameraman rust (*fig. 1*).

Fig. 1. Draagbare apparatuur voor een mobiele post. De camera, die de operateur op zijn schouder draagt, weegt 7 kg. De apparatuur in het draagstel omvat de ultrakortegolfzender, de intersynchronisatie-eenheid, en het richtapparaat voor de antenne met daar bovenop de in een omhulsel gemonteerde richtantenne.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het centrale gedeelte in de reportagewagen omvat drie beeldontvangers, een driekanaalscomparator, een driekanaalscodeerschakeling, de 32-MHz-multiplexzender voor de signalen die naar de mobiele posten gaan, en een driekanaalsstuurinstallatie voor de richtantennes.

Het algemene ontwerp

De werking van het systeem zullen we nu beschrijven aan de hand van het schema *fig. 2*.

Iedere mobiele post heeft zijn eigen tijdbasisgenerator en kan een volledig televisiesignaal leveren. Wordt de camera gebruikt zonder de intersynchronisatie-inrichting, dan wordt de tijdbasis geleverd door een eigen met een kwartskristal gestuurde schakeling. Is de intersynchronisatie in werking, dan is de tijdbasisgenerator afhankelijk van een uitwendig signaal dat in frequentie en faze wordt gestuurd zodanig dat de lijn- en rasterfaze vast gekoppeld zijn aan die van de signalen van de centrale tijdbasisgenerator. De camera levert het uitgangssignaal op het genormaliseerde niveau af (1 V op 75 ohm). Met dit signaal wordt de draaggolf van de 1500-MHz-straalzender in frequentie gemoduleerd; de maximale frequentiezwaai (top-top) is 8 MHz en het uitgangsvermogen is 1 W.

In de reportagewagen komen de videosignalen via drie ontvangers binnen. De lijnfazen en de rasterfazen worden hier vergeleken met die van een referentiesignaal (*synchr. ref.* in fig. 2). Hierdoor worden correctiesignalen verkregen, die in digitale vorm worden gecodeerd en daarna worden gecombineerd met de commandosignalen (waaronder ook de drie stuursignalen voor de antennes) die naar de mobiele posten worden uitgezonden. Het volledige pakket informatie dat de 32-MHz-commandoverbinding aan de mobiele post levert, omvat nu de volgende gegevens:

1) De vier correctiesignalen voor de lijn- en rasterfaze, samen met een signalering betreffende de antenne-aansluiting, die door een indicatorlampje („tally light") voor elke mobiele post afzonderlijk kenbaar wordt gemaakt.

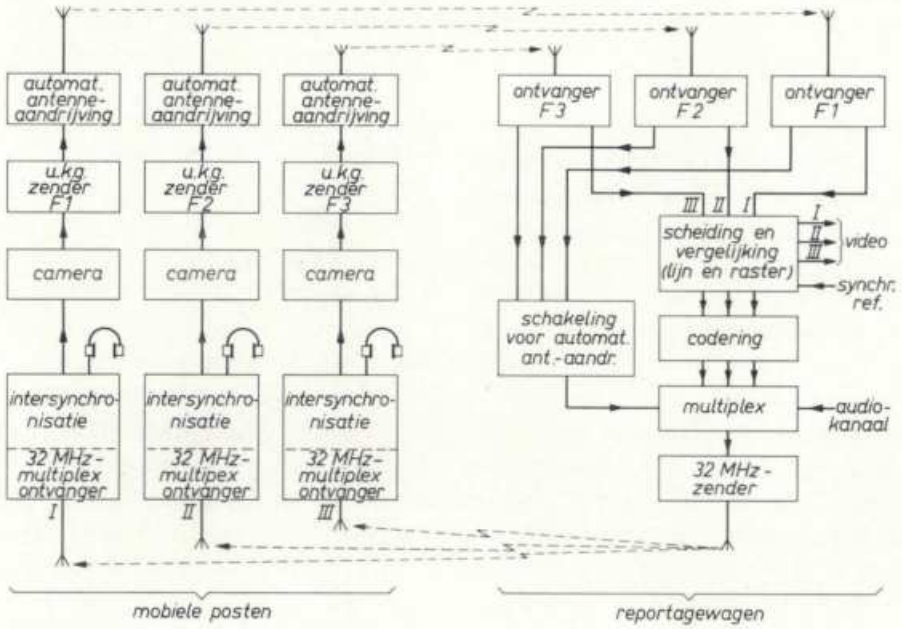


Fig. 2. Blokschema van het gehele systeem, bestaande uit een vast gedeelte in de reportagewagen en drie mobiele posten.

2) Aanwijzingen voor de operateurs via een audiokanaal (voor alle drie posten tegelijk).

3) De stuursignalen voor de richtantennes (voor elke post afzonderlijk).

We wijzen er nog eens op dat de installatie dank zij de opbouw van elke mobiele post uit vier geheel onafhankelijke eenheden ook op allerlei andere manieren dan volgens fig. 2 kan worden gebruikt. Elke camera kan b.v. geheel afzonderlijk opereren, waarbij het videosignaal b.v. wordt geregistreerd op magneetband. Voorts kunnen de gesynchroniseerde mobiele posten worden gebruikt voor een verbinding via een coaxiale kabel; voor dit doel is voorzien in een speciale inrichting om de videosignalen en de intersynchronisatiesignalen in tegengestelde richtingen over dezelfde kabel te

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kunnen sturen. Ten slotte kan de intersynchronisatie-inrichting ook afzonderlijk worden gebruikt om de tijdbasisgenerator van de reportagewagen te synchroniseren met die van een ander verzamelcentrum.

Het principe van de intersynchronisatie-inrichting

Voor de onderlinge synchronisatie van de verschillende mobiele posten moet aan de volgende eisen worden voldaan.

a) Vastlegging van de lijn- en van de rastersignalen in frequentie en faze op het punt in de schakeling waar de signalen worden vergeleken met het referentiesignaal.

b) De fout in de lijnsynchronisatie mag onder de ongunstigste omstandigheden niet meer dan $\pm$ 200 ns bedragen.

c) De intersynchronisatiesignalen voor elke camera mogen een bandbreedte van hoogstens enkele kHz beslaan.

De lijn-intersynchronisatie

Bij de gekozen methode van lijn-intersynchronisatie wordt de aanvankelijke frequentie-afwijking gecorrigeerd door een betrekkelijk langzaam systeem. Voor kleine fluctuaties van de lijnfaze, die tijdens een opname optreden, treedt een snelle digitale regeling in werking. Hierbij worden correctiestappen ter grootte van 100 ns naar boven of beneden uitgevoerd met een maximaal tempo van 50 per seconde.

De digitale regeling wordt bestuurd door drie signalen: „vooruit", „achteruit" en „stop". Deze signalen worden door de commandoverbinding overgebracht als golftreintjes van twee hulpdraaggolven die elk de waarde „0" en „1" kunnen aannemen, met een herhalingsfrequentie van 50 Hz. Dezelfde signalen worden ook gebruikt om de frequentieregeling in de nulstand te houden. Na het inschakelen, als de frequentie in het algemeen nog niet de juiste waarde heeft, kan het systeem al naar het teken van de afwijking op het signaal „vooruit" dan wel „achteruit" worden geblokkeerd totdat de fout zo klein geworden is dat het snelle systeem de correctie verder kan uitvoeren.

Om de werking van het systeem nader toe te lichten, nemen we even aan dat de oscillator van de mobiele post synchroon loopt met de centrale referentie-oscillator (*synchr. ref.* in fig. 2) maar dat de faze niet klopt. Men kan nu de faze corrigeren door een zodanige extravertraging t te introduceren dat de totale vertraging een geheel veelvoud wordt van de lijnperiode T_L. De vereiste extravertraging zal veranderen wanneer de mobiele post van plaats verandert. Zijn dus $\tau_1 \ldots \tau_n$ de vaste optredende vertragingen (looptijden) in het systeem, dan moet t zo worden ingesteld dat $N \times T_L = \tau_1 + \ldots + \tau_n + t$, waarbij N een geheel getal is, en als de mobiele post zich verplaatst, moet t voortdurend bijgeregeld worden om N een geheel getal te doen blijven. Om de waarde van t op ieder ogenblik te kunnen bijregelen, wordt in het systeem een digitale fazedraaier met een permanent geheugen gebruikt, die t in stappen van (ongeveer) 100 ns kan variëren (dit komt globaal overeen met een beeldelement in het televisiebeeld). De inrichting onthoudt de vooraf gekozen waarde van t voor onbepaalde tijd als de fazecomparator van de reportagewagen het stopsignaal uitzendt of als de verbinding verbroken wordt. De fout wordt in deze comparator elke 20 milliseconden (d.i. de tijd T_F van één rastercyclus) gemeten. Is hij kleiner dan 100 ns, dan wordt geen correctie toegepast; is hij groter dan 100 ns, dan wordt een correctiesignaal naar de mobiele post gezonden en t wordt met een bedrag van 100 ns in de juiste richting veranderd. Aangezien deze correctie elke 20 ms wordt uitgevoerd, zal iedere fout in de totale vertraging τ gelijk of groter dan 100 ns binnen een tijdvak $(\tau/100) \times T_F$ hersteld zijn. Om overcorrectie te vermijden, is de gevoeligheidsdrempel van het systeem op een waarde iets boven 100 ns ingesteld.

Deze correctiemethode werkt stabiel mits de straalzenderverbinding niet te lang is en de mobiele post zich niet met te grote snelheid verplaatst. De looptijd voor het correctiesignaal mag nl. niet langer dan 15 milliseconden zijn, hetgeen beantwoordt aan een maximaal toelaatbare lengte van de straalzenderverbinding van 2000 km. Verder maakt de waarde van 100 ns, die wij voor de correctiestapjes hebben gekozen, het theoretisch mogelijk de fazevariatie ten gevolge van het Doppler-effect bij beweging van de mobiele post te compenseren tot snelheden van 5400 km/h; in de praktijk ligt de grens wegens de frequentiefluctuatie van de oscillators iets lager, nl. bij 2500 km/h.

Valt de 32-MHz-verbinding plotseling uit, dan interpreteert de fazedraaier het ontbreken van een signaal als een stopcommando. De oscillator die door de fazedraaier wordt bestuurd heeft echter een zeer lange responsietijd, zodat de fazefout pas na 10 à 20 s de toelaatbare grenzen zal overschrijden.

De fazedraaier met permanent geheugen werkt als volgt (*fig. 3*). In de uitgangsketen van de referentie-oscillator van een tijdbasisgenerator met de voor televisie gebruikelijke frequentie $2F_L$ (F_L = lijnfrequentie) zijn een aantal netwerken geschakeld, die toenemende fazedraaiingen φ_0, φ_1, $\varphi_2 \ldots \varphi_n$ leveren. Deze netwerken zijn aangesloten op een elektronische schakelaar, die vooruit of achteruit kan lopen. Iedere fazestap beantwoordt aan (ongeveer) 100 ns. Heeft de elektronische schakelaar een volledige „omwenteling" gemaakt, dan staat hij weer op φ_0 en er is een fazedraaiing vooruit of achteruit ter grootte van 2π teweeggebracht. Blijft de schakelaar continu doorlopen, dan varieert hij dus de frequentie van de stuuroscillator continu.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Zouden we dit systeem inderdaad laten werken met een frequentie van $2F_L$ voor de referentie-oscillator als boven genoemd, waarbij de cyclustijd 32 μm zou bedragen, dan zou het beschreven „fazewiel" niet minder dan 32/0,10 = 320 fazedraaiende netwerken en een elektronische schakelaar met 320 standen moeten bevatten om alle mogelijke vertragingen met een nauwkeurigheid van 100 ns te kunnen realiseren. Dit zou een zeer omslachtige oplossing zijn. Daar het systeem echter niets anders doet dan elke 20 ms de fazefout te onderzoeken en correctiestappen van 100 ns vooruit of achteruit in dit tempo te leveren, kunnen we de oscillatorfrequentie binnen zekere grenzen willekeurig kiezen. Vermenigvuldigen we de frequentie met een factor k, dan wordt het vereiste aantal netwerken voor het be-

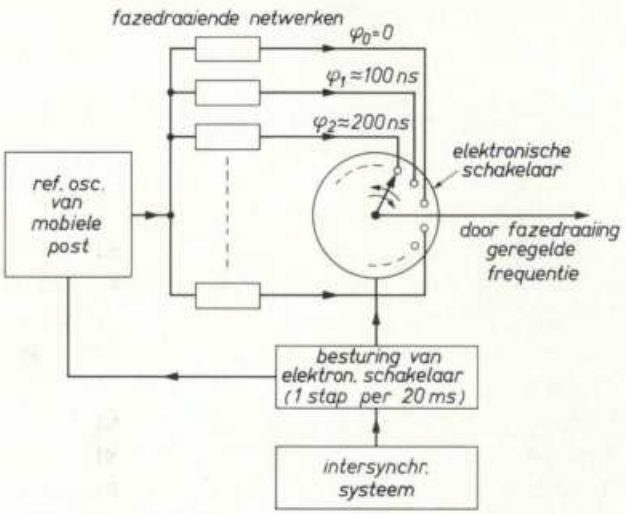


Fig. 3. Systeem met „fazewiel" voor snelle digitale regeling van de tijdbasisfrequentie in iedere mobiele post. De elektronische schakelaar die het „wiel" aandrijft loopt met een snelheid van één stap per 20 ms. Instructies van het intersynchronisatiesysteem zorgen ervoor dat het fazewiel in de juiste richting loopt. De frequentie van de tijdbasisreferentie-oscillator wordt hiermee met een snelheid van (ongeveer) 100 ns per 20 ms in faze gecorrigeerd.
Bij de gebruikelijke referentiefrequentie $f = 2F_L = 32$ kHz zouden voor het leveren van de fazestappen van 100 ns niet minder dan 320 fazedraaiende netwerken nodig zijn. Door een ongeveer 100× hogere referentiefrequentie te kiezen, wordt het vereiste aantal netwerken tot 3 teruggebracht, zoals in de tekst wordt verklaard.

schrijven van één cyclus k maal kleiner, en het aantal omwentelingen dat de elektronische schakelaar moet maken om een bepaalde looptijdvariatie te corrigeren k maal groter. De grootste waarde van k die wij kunnen kiezen is diegene waarbij het aantal netwerken wordt gereduceerd tot drie; de fazedraaiingen verschillen dan telkens 120° (bij slechts twee netwerken zou de richting van de draaiing niet meer ondubbelzinnig zijn).

Met dit fazecorrectiesysteem kunnen frequentieverschillen worden gecorrigeerd, maar het is toch noodzakelijk er een automatisch *voorcorrectiesysteem* voor de frequentie aan toe te voegen, aangezien de fazecorrectie, die hoogstens elke 20 ms een sprong van 100 ns teweeg kan brengen, niet voldoende is om het verloop van de lokale oscillator te compenseren. (Men zou dit kunnen verbeteren door de herhalingsfrequentie waarmee het vergelijken plaatsvindt op te voeren en daarmee een snellere correctie teweeg te brengen, maar de toelaatbare looptijd zou dan in dezelfde verhouding worden verminderd.) Bovendien is het niet raadzaam de elektronische schakelaar ervoor te gebruiken om permanent een frequentie-afwijking te compenseren, aangezien de schakelaar dan continu zou moeten lopen, wat een storende fluctuatie met een periode van 100 ns zou introduceren. Dank zij het voorcorrectiesysteem behoeft er slechts elke 20 of 30 s een sprong van 100 ns plaats te vinden, hetgeen nauwelijks merkbaar is.

Er zij op gewezen dat dank zij de toepassing van het voorcorrectiesysteem voor de frequentie ook een grotere verplaatsingssnelheid toelaatbaar wordt dan alleen met het snelle correctiesysteem. De grens schuift nu op van 2500 km/h naar 12 000 km/h — een snelheid waarmee men slechts in zeer uitzonderlijke gevallen te maken zal kunnen krijgen.

Rastersynchronisatie

Aangezien de rastersynchronisatiesignalen verkregen worden door deling van een frequentie die het dubbele van de lijnfrequentie F_L is, is een inrichting ontwikkeld die een verschuiving van de rastersynchronisatiesignalen corrigeert door geschikte wijziging van de deelfactor van de desbetreffende deelschakeling. De correctie vindt hierbij plaats met een snelheid van twee lijnen per raster.

De informatie voor deze besturing van de deelschakeling wordt verkregen met behulp van een comparator, die als resultaat van de vergelijking met het referentiesignaal (*synchr. ref.* in fig. 2) voor ieder intersynchronisatiekanaal twee binaire signalen X en Y levert. De combinatie van deze twee binaire signalen bepaalt volgens onderstaande code de factor waardoor de deelschakeling moet delen (Tm = beeldsynchronisatiesignalen van de mobiele camera, Tr = beeldsynchronisatiesignalen van de referentie-oscillator):

X	Y	deelschakeling deelt door:	richting van de verschuiving van Tm vergeleken met Tr
1	1	625	geen verschuiving
0	0	625	geen verschuiving
0	1	623	Tm loopt voor op Tr
1	0	627	Tm loopt achter bij Tr

Het stopcommando voor de rastercorrectie wordt gegeven in de toestanden (0,0) en (1,1). Het verschil

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tussen deze twee toestanden wordt gebruikt om informatie betreffende de aansluiting van het centrale station naar de mobiele posten over te brengen: in de toestand (0,0) vindt deling door 625 plaats en een waarschuwingslampje (het „tally light") gaat branden dat aangeeft dat het signaal op de antenne staat, terwijl in toestand (1,1) wederom deling door 625 plaatsvindt maar het waarschuwingslampje dooft en geen signaal op de antenne komt. Bij de andere combinaties blijft het waarschuwingslampje eveneens gedoofd, aangezien de desbetreffende post dan immers nog geen gesynchroniseerde beelden kan uitzenden.

Principe van het antennerichtsysteem

We hebben hierboven vermeld dat ter vermindering van storingen door gereflecteerde signalen de zendantenne automatisch wordt gericht. Dit wordt als volgt teweeggebracht. Stel, men zendt uit via een richtantenne die zo kan worden gedraaid dat de hoofdlus van het stralingsdiagram in twee verschillende richtingen A en B kan wijzen, zoals in *fig. 4a* is geschetst. Stel nu dat een ontvanger zich achtereenvolgens in R_1, R_2, R_3 bevindt. Het in R_1 ontvangen signaal is het sterkst indien de bundel in stand B is. De ontvangst in R_2 is het sterkst bij de bundelstand A. In R_3 ten slotte, waarbij de ontvanger zich op de symmetrie-as van de figuur bevindt, is het ontvangen signaal even sterk voor de bundelrichting A als voor de bundelrichting B. Schakelen we nu de bundel in langzaam tempo heen en weer tussen de richtingen A en B, dan zal de signaalsterkte die in de drie posities van de ontvanger wordt verkregen als functie van de tijd verlopen volgens de drie lijnen in fig. 4*b*. Zoals men ziet is de ontvangen veldsterkte constant als de ontvanger zich op de as van de figuur bevindt die door de twee bundels wordt beschreven. De veldsterkte krijgt echter een amplitudemodulatie als de zender zo gericht is dat de ontvanger zich *niet* op deze as bevindt. Let men bovendien op de fazeverschuiving tussen deze amplitudemodulatie en het signaal dat het heen en weer schakelen van de bundel teweegbrengt, dan ziet men dat deze verschuiving 180° zal verschillen naar gelang van de richting van de richtfout.

Bij detectie van het ontvangen signaal in de reportagewagen krijgen we derhalve een wisselspanningssignaal dat verdwijnt zodra de antenne goed gericht is en waarvan de faze omkeert wanneer het door nul gaat. Van dit wisselspanningssignaal worden de signalen voor het richten van de zendantenne afgeleid. Zoals vermeld, worden zij via de 32-MHz-verbinding overgebracht. Een synchrone detector in de mobiele post levert de correctiespanning voor de motor die de antenne draait. Om de twee afwisselende bundelrichtingen te krijgen, bestaat de antenne uit twee boven elkaar aangebrachte stralers met deflectors die langs verschillende assen georiënteerd zijn. Met behulp van een schakeldiode worden de beide stralers afwisselend bekrachtigd.

Een laatste belangrijk punt in de opzet van dit systeem is de manier waarop bij het opstellen van de apparatuur de gunstigste richting wordt gevonden. Hiertoe laat het besturingssysteem de antenne een volledige omwenteling van 360° maken; gedurende deze omwenteling onderzoekt het systeem de amplitudekarakteristiek van de ontvangen signalen en onthoudt de hoek waarbij de beste ontvangst wordt verkregen. Bij de volgende omwenteling krijgt dan het servomechanisme bij het bereiken van de desbetreffende stand het commando de antenne hierin vast te houden.

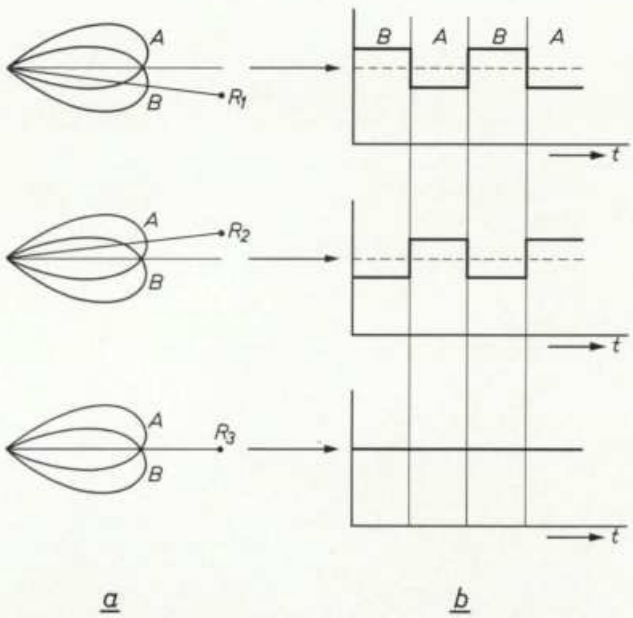


Fig. 4. Ter verklaring van de inrichting voor het automatisch richten van een richtantenne. Geeft men de hoofdlus van het stralingsdiagram van de antenne afwisselend twee verschillende richtingen A en B en plaatst men hierbij een ontvanger in elk van de drie in (*a*) aangegeven posities R_1, R_2, R_3, dan verloopt de ontvangen signaalamplitude als functie van de tijd respectievelijk volgens de drie in (*b*) getekende lijnen.

Slotopmerkingen

Reeds in de eerste maanden na ingebruikneming van de apparatuur door de O.R.T.F. is duidelijk het nut van de onafhankelijke camera-eenheden gebleken, vooral door het feit dat deze met hun uitgangen op genormaliseerd niveau op zeer uiteenlopende apparatuur kunnen worden aangesloten. Dat het nieuwe systeem, hoewel het aanzienlijk veelzijdiger is dan de voorafgaande apparatuur, niet omvangrijker en zwaarder geworden is, is te danken aan de toepassing van

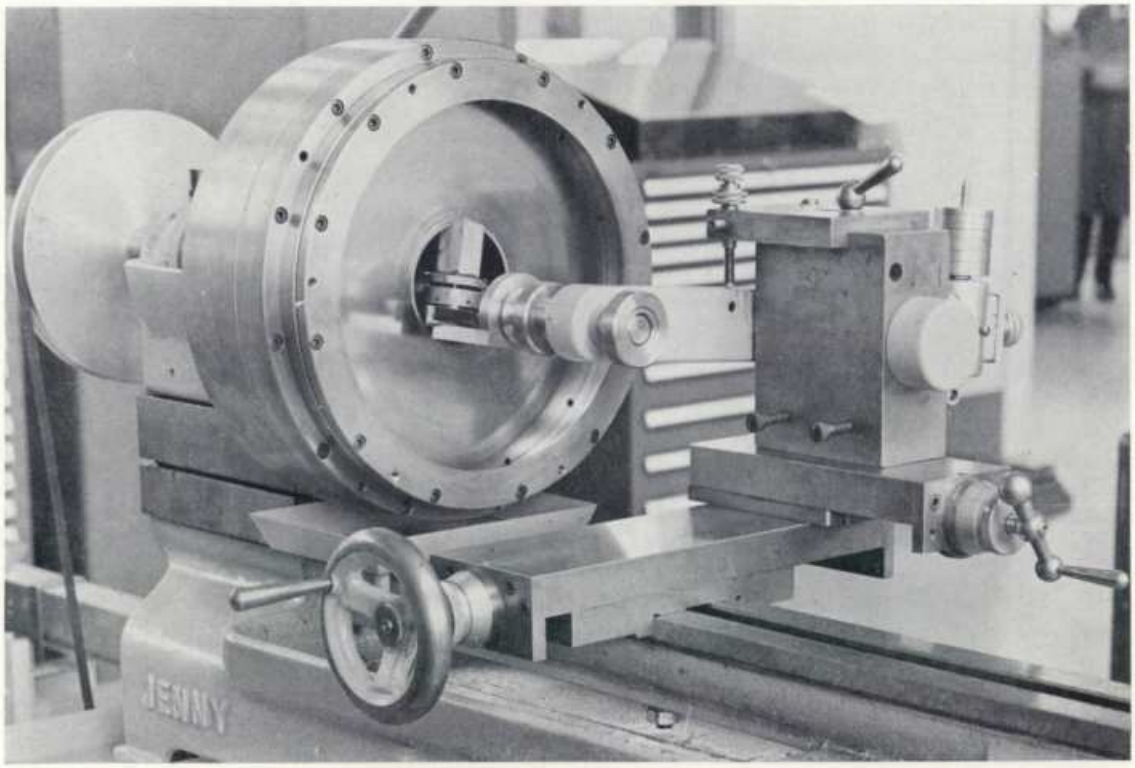
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geïntegreerde schakelingen en microminiaturisatie-technieken. Terwijl b.v. de tijdbasisgenerator van de oorspronkelijke installatie een volume van 1000 cm³ innam, is dit bij de nieuwe generator nog slechts 170 cm³. Een extra-voordeel van deze installatie is dat sommige van de onderdelen (de zender, de ontvanger en de intersynchronisatie-inrichting) ook in een kleurentelevisieverbinding kunnen worden gebruikt.

Samenvatting. Beschrijving van een nieuwe geheel onafhankelijke installatie voor televisiereportages, waarvan de werking enkele nieuwe aspecten vertoont. De installatie bevat één of meer mobiele cameraposten, die door een op 1500 MHz werkende straalzender verbonden zijn met de reportagewagen. De belangrijkste onderdelen van het systeem zijn: de draagbare camera, die alle vereiste hulpinrichtingen bevat; een volledig gedigitaliseerde intersynchronisatie-inrichting voor het synchroniseren van de tijdbases; een automatisch richtsysteem voor de antennes, waardoor de invloed van reflexies vrijwel wordt geëlimineerd; en een 32-MHz-straalzender met een aantal kanalen voor het overbrengen van besturingssignalen van de reportagewagen naar de mobiele posten.

Een membraanzaagmachine



Het zagen van brosse materialen, zoals halfgeleiders, veroorzaakt soms aanzienlijke moeilijkheden indien men zo weinig mogelijk materiaal wil verliezen en het kristalrooster zo weinig mogelijk wil verstoren. Aan deze voorwaarden wordt in hoge mate voldaan door een membraanzaagmachine, die door A. Charles-Georges en A. Salmon in het LEP is ontwikkeld [1].

De machine bevat een drager in de vorm van een schotel, waarop door middel van een aantal schroeven een ringvormig metalen mes wordt geklemd. Het membraanachtige mes kan dan worden gespannen en volkomen vlak gemaakt door middel van een tweede stel

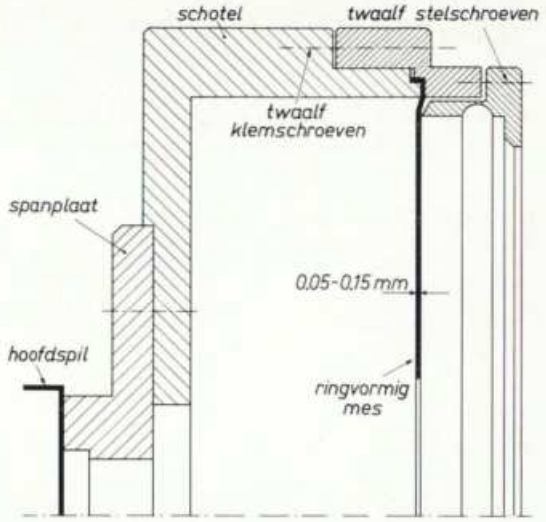
[1] Frans octrooi no. 1500037 van 13 juni 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schroeven. Hierbij kan tevens ervoor worden gezorgd dat het vlak van het mes nauwkeurig loodrecht op de draaiingsas staat. Men kan de maximale fout, gemeten ter plaatse van de snijkant, kleiner maken dan 5 μm. Op de snijkant wordt hetzij een vast slijpmiddel aangebracht, hetzij een suspensie van slijpmiddel in olie.

Het te zagen werkstuk wordt aan het eind van een scharnierende arm bevestigd die wordt gedragen door twee sleden; een van deze sleden beweegt evenwijdig met de draaiingsas, de andere loodrecht hierop. Aan het andere einde van de arm is een stel contragewichten aangebracht, waardoor het mogelijk is de kracht bij het zagen te regelen. Past men een geringe draaisnelheid toe (snijsnelheid tussen 0,25 en 0,40 m/s) en een zeer constante kracht (deze kan door het systeem van contragewichten binnen 2 gram constant worden gehouden), en gebruikt men een suspensie met vrij zwevend slijpmiddel, dan kan men met de membraanzaagmachine dunne schijfjes van een werkstuk afsnijden waarvan de oppervlakken binnen zeer nauwe toleranties evenwijdig zijn. Zo kan men b.v. een germaniumschijfje maken ter dikte van 0,5 mm en met een diameter van 80 mm waarvan de grensvlakken binnen 20 μm evenwijdig zijn.



Beschikt men over een reeks messen met oplopende binnendiameter, dan kan men eventueel ook grotere werkstukken zagen, b.v. rechthoekige schijfjes van germanium van 150×45 mm ter dikte van 1 mm, waarvan de grensvlakken binnen 30 μm evenwijdig zijn.

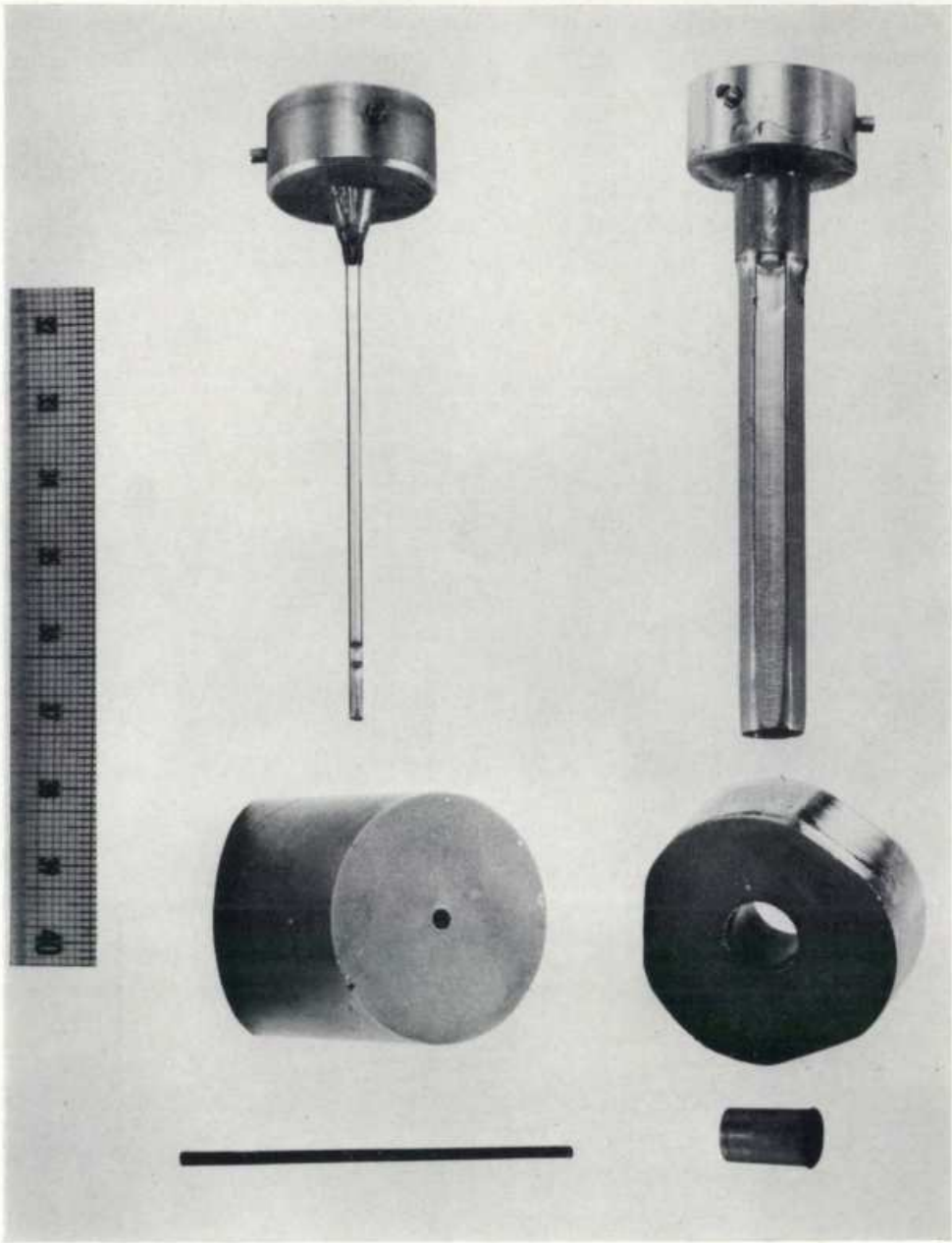
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een kernboormethode voor nauwe gaten

De bestaande mechanische bewerkingsmethodes voor brosse materialen zijn onlangs aangevuld met een nieuwe methode, die in het LEP is ontwikkeld door A. Charles-Georges en A. Salmon en die berust op het principe van het zg. kernboren [1]. Het belangrijkste probleem bij het kernboren is, hoe het slijpmiddel naar de plaats waar het zijn werk moet doen moet worden gevoerd en hoe het tijdens de gehele bewerking moet worden ververst. Dit wordt des te moeilijker naarmate de diameter van het te boren gat kleiner is in verhouding tot zijn lengte (diameter b.v. 2 mm bij een lengte van 80-100 mm).

Men lost het probleem op door de boor te voorzien van twee stellen kanalen, het eerste stel voor de aanvoer van nieuw slijpmiddel, het tweede voor het afvoeren van het afgewerkte slijpmiddel en het slijpsel. Deze



[1] Frans octrooi no. 1568837 van 22 december 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kanalen treden nu vanzelf op wanneer men de boor de vorm geeft van *een buis met een veelhoekige doorsnede*. Al draaiend doet zulk een boor in het oppervlak van het werkstuk een ringvormige gleuf ontstaan, waarvan de buiten- en binnendiameter respectievelijk de omgeschreven en de ingeschreven cirkel van de veelhoek zijn. Bij het dieper in het materiaal dringen produceert de boor dus een cilindrisch gat, terwijl midden in dit gat een cilindrische kern blijft staan. Tevens heeft men één stel kanalen tussen de veelhoekige boor en de wand van het gat, en een tweede stel kanalen tussen de boor en de kern.

De aldus geboorde gaten zijn geheel recht, en dank zij de toepassing van een suspensie met vrij zwevend slijpmiddel krijgt men slechts een zeer geringe verstoring van het kristalrooster.

Met de beschreven methode hebben wij gaten kunnen boren met een diameter van 0,9 mm en een diepte van 30 mm, maar ook grotere gaten, b.v. met een diameter van 5 mm en een diepte van 150 mm.

Doordat men zonder moeite de kern uit het geboorde gat kan halen, heeft men hiermee ook een elegante methode voor het vervaardigen van zeer dunne cilindrische staafjes.

Jaargang 30, 1969, no. 8/9/10 blz. 217-318 Verschenen 30 januari 1970

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!